
Niveau(x) d'enseignement: 4
Centre d'intérêt: 845

Numéro EDUG : 9270798

Janvier, Claude.

Evolution des écosystèmes : représentation et compréhension / par Claude Janvier, Maurice Garançon et Claudine Mary. -- Montréal : Université du Québec à Montréal, Centre interdisciplinaire de recherche sur l'apprentissage et le développement en éducation, 1992.

41 f. : ill. ; 29 cm. -- (Séminaire sur la représentation ; 68)

Bibliogr. : f. 38-39.

ISBN 2-921284-89-8

Vedette(s)-secondaire(s): Garançon, Maurice * Mary, Claudine * Université du Québec à Montréal, Centre interdisciplinaire de recherche sur l'apprentissage et le développement en éducation

Descripteur(s): Ecologie * Système * Logiciel * Secondaire (Ordre d'enseignement)

Identificateur(s) de sujet: Ecosystème

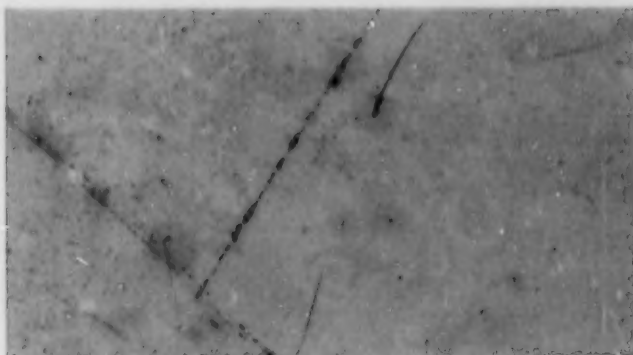
Ce document analyse la notion d'écosystème en tant que système à rétroaction sous l'angle des représentations servant à le définir. La compréhension du système à rétroaction y est présentée comme résultant d'une utilisation efficace et coordonnée des différentes représentations de l'évolution de ce système permettant, entre autres, de caractériser son évolution. On y décrit un logiciel interactif permettant aux élèves d'introduire des perturbations dans un système en évolution et d'en juger les conséquences. On présente ensuite des résultats d'expérimentations de ce logiciel avec des élèves du secondaire en écologie. En bref, il ressort que 1) le logiciel s'avère un instrument intéressant pour introduire chez les élèves la notion de systèmes; 2) l'apprentissage que peuvent réaliser les élèves est limité par leur compétence à utiliser les graphiques; 3) le contexte du logiciel initie les élèves à la notion fondamentale d'équilibre dynamique dont la maîtrise est inégalement assurée selon les représentations graphiques utilisées.

Type de document:

**CENTRE INTERDISCIPLINAIRE DE RECHERCHE SUR
L'APPRENTISSAGE ET LE DEVELOPPEMENT EN EDUCATION**

9270798

cirade



Université du Québec à Montréal

9270798

**Évolution des écosystèmes:
représentation et compréhension**

par Claude Janvier, Maurice Garançon et
Claudine Mary¹.
Université du Québec à Montréal

Séminaire sur la Représentation

30 novembre 1990 - n° 68

CIRADE, UQAM, avril 1992

¹ Monsieur Claude Janvier est professeur au Département de mathématiques et d'informatique et professeur au CIRADE.
Monsieur Maurice Garançon est professeur au Département de mathématiques et d'informatique.
Madame Claudine Mary est agente de recherche et de planification au CIRADE.

RÉSUMÉ

La notion de système est omniprésente dans le monde qui nous entoure d'où, son importance dans les programmes scolaires. Cependant, exigeant des mathématiques avancées, les systèmes ne sont souvent introduits qu'indirectement dans les cours d'écologie.

Lors de cette présentation, nous analyserons la notion d'écosystème en tant que système à rétroaction sous l'angle des représentations servant à les définir. La compréhension du système à rétroaction y est défini comme résultant d'une utilisation efficace et coordonnée des différentes représentations de l'évolution de ce système permettant entre autres, de caractériser son évolution.

Nous décrirons un logiciel interactif permettant aux élèves d'introduire des perturbations dans un système en évolution et d'en juger les conséquences.

Nous présenterons ensuite des résultats d'expérimentations de ce logiciel avec des élèves du secondaire. En bref, il en ressort que 1) le logiciel s'avère un instrument intéressant pour introduire chez les élèves la notion de systèmes; 2) l'apprentissage que peuvent réaliser les élèves est limité par leur compétence à utiliser les graphiques; 3) le contexte du logiciel initie les élèves à la notion fondamentale d'équilibre dynamique dont la maîtrise est inégalement assurée selon les représentations graphiques utilisées.

DESCRIPTEURS

Système
Écologie
Enseignement
Rétroaction
Écosystème
Représentation
Logiciel
Interaction
Diagramme de phase
Graphique multi-courbes

1. Pertinence, problématique et cadre théorique

a) Introduction

Un système est communément défini comme étant un ensemble de parties ou de variables interreliées les unes avec les autres et obéissant à un but plus ou moins explicite. Une centrale nucléaire, l'économie d'une région ou les variations de populations vivant dans un milieu spécifique sont des exemples de systèmes. Les systèmes cardio-vasculaire, respiratoire et hormonal, pour ne nommer que ceux-là, en sont aussi des exemples. Aujourd'hui, la plupart des élèves du secondaire sont introduits assez tôt aux systèmes par l'intermédiaire des écosystèmes. Il s'agit de populations d'animaux ou de végétaux vivant dans un milieu spécifique et étant reliés entre eux par des relations proie-prédateur. Les écosystèmes ont l'avantage d'impliquer des parties ou variables qui peuvent être correctement appréhendées par une vaste majorité d'élèves du secondaire même si la notion de population n'est pas aussi primitive qu'on voudrait le croire (cf. 1h). De plus, les élèves sont relativement familiers avec les relations qui sont impliquées dans de tels systèmes. **Ces caractéristiques font des écosystèmes les candidats idéaux pour servir de paradigmes à une grande variété de systèmes.**

b) Écosystème et représentations graphiques: compréhension versus représentations

Les systèmes sont en général trop complexes pour permettre une analyse qui prenne en considération tous les facteurs qui sont déterminants. Leur étude ne peut s'effectuer qu'à travers des modèles qui font une sélection des facteurs impliqués et des relations hypothétiques qui les unissent. Le système est alors assimilé à son modèle qui doit refléter de différentes manières des caractéristiques identiques à celles du système. Du modèle, on fait des représentations. On représente les relations qui décrivent le système (ou plutôt le modèle) et on représente l'évolution du système (du modèle) qui découle de ces relations.

Pour nous, comprendre un système à rétroaction s'assimile à pouvoir en donner les caractéristiques, c'est-à-dire pouvoir décrire les relations entre les variables, en décrire l'évolution et éventuellement prédire le comportement du système lorsque soumis à une perturbation. Ces descriptions se font via un modèle dont on fait des représentations.

Notre modèle de base pour toute notre analyse et pour le didacticiel que nous-mêmes avons conçus est celui de Lotka-Volterra (cf. Appendice). Notre préoccupation est donc la compréhension de la rétroaction de ce modèle. Par ailleurs, comprendre la rétroaction n'est pas indépendante des représentations qu'on se fait du modèle. Nous sommes convaincus que comprendre un système à rétroaction consiste à pouvoir utiliser de façon efficace les différentes représentations d'un modèle particulier pour arriver à caractériser l'évolution du système.

Une partie de notre travail a donc consisté à étudier les différentes représentations d'un système à rétroaction.

c) Rétroaction: équilibre et régulation

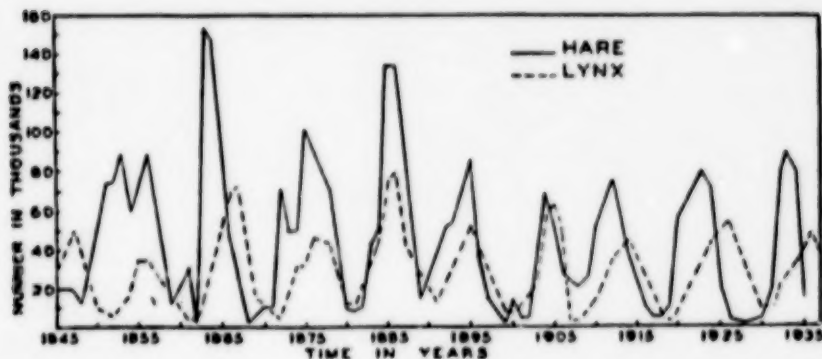
On a rétroaction quand dans un système une variable agit sur elle-même par l'intermédiaire d'autres variables. Dans un écosystème, on a des prédateurs qui dépendent de proies, qui dépendent à leur tour d'autres proies et ainsi de suite. Ainsi, les prédateurs en capturant des proies entraînent une **diminution de la population des proies**. Mais les proies en diminuant réduisent la nourriture des prédateurs qui ainsi diminuent en nombre. Moins de prédateurs entraînent une **augmentation du nombre de proies**.² Manger les proies a des conséquences sur la population des proies mais aussi, par rétroaction justement, sur la population des prédateurs. La notion de rétroaction suppose celle d'équilibre et de régulation.

d) Exemple type: les lièvres et les lynx

Prenons l'exemple simple et maintenant classique des lynx et des lièvres du nord canadien; exemple souvent proposé aux élèves dans leur premier cours d'écologie.

La compagnie de la Baie d'Hudson a fait le décompte des peaux de lièvres et de lynx trapées par les coureurs des bois sur un siècle. Les populations de lièvres et de lynx vivant alors sont supposées proportionnelles aux nombres d'animaux tués. Ces données sont transcrites dans le graphique multi-courbes ci-dessous montrant ainsi l'évolution des deux populations simultanément.

FIGURE 1



GRAPHIQUE DE LA BAIE D'HUDSON

(Tiré de ODUM, E., P.: *Fundamentals of Ecology*. W.B. Saunders Co. (1968), 2nd edition)

Ce système des lièvres («hare») et des lynx nous servira d'exemple à travers l'étude des différentes représentations d'un système.

² Cette suite d'inférences sera explicitée plus loin.

On a donc deux populations qui varient sous l'influence l'une de l'autre. Le graphique révèle des augmentations et des diminutions de chacune des populations. De plus, ces variations respectent une certaine régularité. On peut constater des cycles d'environ une dizaine d'années. Cette représentation est particulièrement appropriée lorsqu'on veut donner le portrait de l'évolution de deux populations sur une période donnée. Mais, le graphique n'est pas facile à interpréter pour qui n'en a pas la clé. En effet, **les deux courbes doivent être interprétées simultanément et chaque courbe l'une en fonction de l'autre**. Et, l'interprétation simultanée suppose qu'on introduise des relations de cause à effet et un temps. Une de nos préoccupations didactiques, dès le début de la recherche, fut de conjuguer ce type de graphique, le multi-courbes, avec ce qu'on appelle généralement le diagramme causal (la clé). Ce diagramme schématise la rétroaction entre deux variables.

e) Rétroaction et diagramme causal

Le diagramme causal fournit grossièrement les relations entre les variables lynx (les prédateurs) et lièvres (les proies). Le diagramme ci-dessous a deux flèches marquées en leur pointe d'un signe «+» ou «-» selon le sens des changements des deux populations, dans le même sens (+) ou dans le sens opposé (-).

FIGURE 2



DIAGRAMME CAUSAL

Le diagramme peut se traduire en mots de la façon suivante:

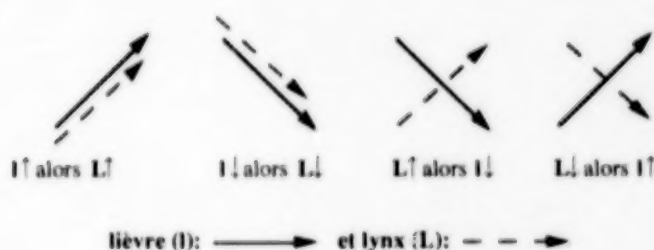
- 1) Une augmentation des lièvres entraîne une augmentation des lynx (de même une diminution des lièvres entraîne une diminution des lynx).
- 2) Par contre, un accroissement des lynx entraîne une diminution des lièvres (de même une diminution des lynx entraîne une augmentation des lièvres).

Ce diagramme illustre deux «boucles à rétroaction». L'une d'elles montre l'effet des lièvres sur eux-mêmes par l'intermédiaire des lynx: par exemple, une augmentation des lièvres entraîne une augmentation des lynx qui entraîne une diminution des lièvres. L'autre montre l'effet des lynx sur eux-mêmes par l'intermédiaire des lièvres. Le comportement d'une population à un moment donné dépend de son comportement l'instant précédent.

La boucle à rétroaction a un effet stabilisateur sur la variable concernée. En effet, par l'intermédiaire des lièvres, une augmentation des lynx entraîne une diminution des lynx et inversement. De même, par l'intermédiaire des lynx, une augmentation des lièvres entraîne une diminution des lièvres et inversement. On parle alors de rétroaction négative. Les proies agissent comme régulateur des prédateurs et ceux-ci comme régulateur des proies.

Le diagramme causal constitue une première étape d'analyse des systèmes à rétroaction à **deux variables**: il fournit les relations du système (tel que modélisé) et il cristallise schématiquement la notion de boucles à rétroaction. Il fournit ainsi une clé pour interpréter le graphique multi-courbes. Ainsi, on peut associer aux relations du diagramme causal des régions du diagramme multi-courbes comme le montre la figure ci-dessous.

FIGURE 3



Le diagramme causal permet d'introduire une relation de cause à effet et de donner ainsi une clé de lecture. Toutefois, le diagramme de la figure 2 ne permet pas d'expliquer comment se fait le passage de la croissance à la décroissance des populations (les points tournants sur le graphique). En fait, il s'agit non pas de la croissance ou de la décroissance des populations mais de l'augmentation ou de la diminution de leur taux d'accroissement. Il faut donc prendre en considération le taux de variation propre de chacune des populations lorsque laissée à elle-même.

Le diagramme 2' augmenté de deux flèches supplémentaires, tient compte d'un facteur de reproduction pour les lièvres et d'un facteur malthusien pour les lynx. On suppose que les lynx ne vivent pratiquement que des lièvres et que ceux-ci ont de la nourriture en abondance et que leur territoire est illimité.

FIGURE 2'



DIAGRAMME CAUSAL

Le système se voit ainsi augmenté de deux nouvelles boucles à rétroaction. À gauche, est schématisée une boucle à rétroaction négative: une augmentation de la population des lynx amènera une plus grande augmentation des décès, puisque le taux de décès sera appliqué à une plus grande population, et donc une diminution de la population. À droite, est schématisée une boucle à rétroaction positive: une augmentation des lièvres amènera une augmentation encore plus grande de la population des lièvres puisque le taux de croissance sera appliqué à une plus grande population.

Chaque flèche du diagramme causal de la figure 2', nous donne une relation que nous traduisons maintenant comme suit:

- 1) Les lièvres laissés à eux-mêmes verront leur population augmenter à un taux constant de façon telle qu'ils connaîtront une croissance exponentielle.
- 2) Les lynx laissés à eux-mêmes verront leur population décroître à un taux constant (décroissance exponentielle) jusqu'à leur disparition.
- 3) Le taux de croissance normal des lièvres décroîtra (augmentera) avec toute croissance (décroissance) de la population de lynx.
- 4) Le taux de croissance normal de la population des lynx augmentera (décroîtra) avec toute croissance (décroissance) de la population des lièvres.

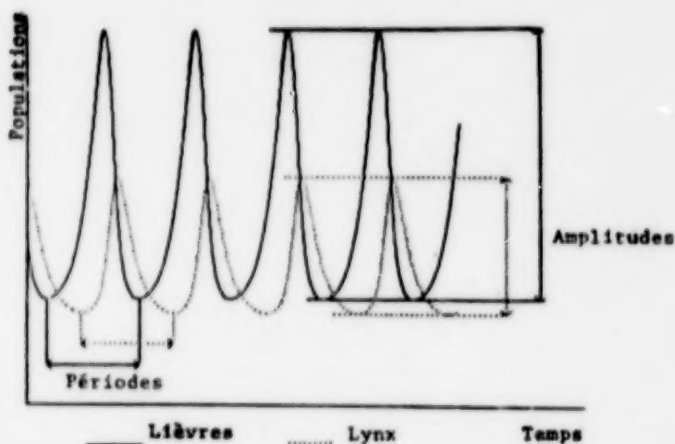
Le diagramme de la figure 2', colle parfaitement au modèle de Lotka-Volterra (cf. appendice). Par ailleurs, il explique l'évolution du système des lièvres et des lynx telle qu'elle est décrite par le relevé de la Baie d'Hudson.

f) Graphique multi-courbes

Les relations entre variables étant établies par le diagramme causal de la figure 2' en particulier, il est maintenant possible d'envisager l'exploration de graphiques d'évolution tels le graphique multi-courbes.

En figure 4, sont données les courbes d'évolution des lièvres et des lynx selon les équations de Lotka-Volterra, aux paramètres près. Elles pourraient être les versions «polies» du graphique obtenu des données recueillies par la Baie d'Hudson.

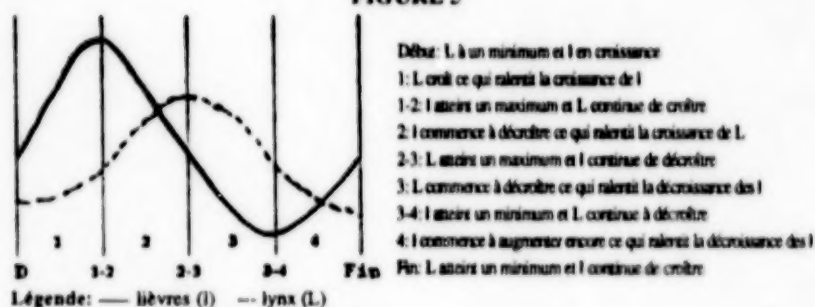
FIGURE 4



GRAPHIQUE MULTI-COURBES

Ce graphique multi-courbes donne simultanément l'évolution de chacune des populations. L'exploration de graphique à l'aide des relations que nous fournit le diagramme causal révèle un certain nombre de caractéristiques de cette évolution. Chaque courbe a une forme quasi-sinusoidale avec des montées et des descentes qui déterminent une amplitude d'oscillation qui lui est spécifique. Elles montrent un pattern qui se répète ce qui veut dire que l'évolution de chaque population est cyclique. Les deux courbes ont la même période. Elles sont cependant déphasées l'une par rapport à l'autre. Les lynx sont «en retard» sur les lièvres. Dans le graphique, on reconnaît quatre régions (cf. figure 5) dont la répétition décrit toute l'évolution de chacune des populations. En présentant le tracé des courbes de façon dynamique, on peut avec les élèves faire une analyse comparative de l'évolution des deux populations simplement en commentant les changements à l'écran. En focalisant l'attention des élèves sur ces quatre régions, on peut mettre en évidence le type de relations qui définissent un écosystème simple. L'analyse comparative des deux courbes est d'autant plus facilement que le mouvement est présent. Cependant, l'interprétation de ces graphiques requièrent plus qu'une observation attentive des courbes lorsqu'elles sont tracées. Il faut coordonner des états et des changements: tâche difficile comme le laisse soupçonner le texte qui accompagne la figure 5.

FIGURE 5



Le graphique multi-courbes permet une certaine exploration des caractéristiques du système que certains pédagogues ont tenté d'exploiter. Le didacticiel «Prey/Predator» de DENHAM-PREECE en est un exemple. Dans ce didacticiel, le facteur d'exploration est la population initiale, seul facteur que l'utilisateur peut changer. Chaque fois, sont tracées sur l'écran les courbes correspondant à l'évolution des populations, selon les populations initiales entrées numériquement. Les courbes tracées³ sont semblables à celles présentées sur la figure 4.

En fournissant l'occasion aux étudiants de changer les populations initiales, on leur permet certainement de faire un pas important vers la découverte des caractéristiques du système. C'est ce que fait Preece. Cependant son didacticiel rend difficile la comparaison de différents ensembles de courbes que déterminent des populations initiales différentes. En effet, un seul de ces ensembles de courbes peut apparaître à la fois à l'écran. La comparaison suppose donc qu'on mémorise les caractéristiques et la forme du ou des ensembles précédents. L'exploration que peuvent faire les étudiants reste donc limitée. Mais comment faire autrement? Si on garde à l'écran les différents ensembles de courbes, celui-ci devient vite surchargé et la comparaison n'en est pas facilitée, au contraire. Ceci nous place devant un dilemme qui ne peut être résolu qu'en considérant la question sous un angle différent.

g) Diagramme de phase

Sur le graphique cartésien, chaque population est représentée par un point qui se déplace en fonction du temps sur deux courbes différentes. En fait, il est possible d'utiliser un seul point qui se déplace alors sur une seule courbe pour décrire l'évolution du système. C'est ce qu'on a avec ce qu'on appelle le diagramme de phase. La figure 6a donne le diagramme de phase correspondant au graphique multi-courbes de la figure 4. Un point représente les deux populations en un même temps (T): une avec la coordonnée x (les lynx) et l'autre avec la coordonnée y (les lièvres). Chaque point dans le diagramme de phase représente un état particulier du système. Le temps n'est plus ici explicite comme dans le graphique multi-courbes. On peut toutefois retrouver cette variable en animant le diagramme de phase.

³ Preece utilise un modèle différent. Elle obtient donc des courbes différentes de celles de la figure 4 mais qui ont avec ces courbes plusieurs caractéristiques en commun.

Un cycle d'évolution du système lynx-lièvres, selon le modèle de Lotka-Volterra, correspond à une courbe fermée dans le diagramme de phase. D'autre modèle, celui de Preece, par exemple, donne des spirales (figure 6c).

FIGURE 6a

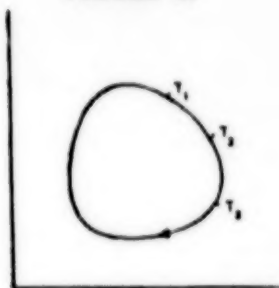


FIGURE 6b



FIGURE 6c



DIAGRAMMES DE PHASE

Spain et Soldan exploitent ce type de diagramme dans un didacticiel appelé PRÉDATION (1983). Les élèves y découvrent que chaque fois que sont changées les populations initiales, une nouvelle courbe fermée est tracée (figure 6b). Cependant, et à chaque fois, une nouvelle simulation doit être déclenchée et l'écran doit être recomposé. La comparaison que permet la figure 6b, en présentant les différentes courbes obtenues de populations initiales différentes, ne peut alors se faire. Sans la possibilité de produire cette figure (6b), les caractéristiques générales communes à toutes les courbes ne peuvent être aisément abordées.

Avec la figure 6b, le diagramme de phase est un outil puissant qui donne beaucoup de sens au travail sur les écosystèmes, dans ses deux versions, statique et dynamique. La figure montre l'existence de courbes fermées, déterminées par une paire de populations initiales. Elle montre que toutes les trajectoires du système «circulent» autour d'un état tel que le système sera stable, un point fixe pour l'évolution. Elle laisse penser (reste à le prouver) que les maximum et les minimum sont alignés avec ce point de stabilité.⁴ Elle montre aussi, mais dans sa version dynamique seulement, qu'un maximum de lynx est suivi d'un minimum de lièvres qui est suivi

⁴ Ceci peut être prouvé en utilisant la notion d'isocline.

d'un minimum de lynx qui à son tour est suivi d'un maximum de lièvres suivi d'un maximum de lynx et ainsi de suite. Mais surtout, elle permet de prédire les conséquences de perturbations en cours d'évolution. En effet, changer une population en cours d'évolution consiste à passer à une autre courbe. Et l'effet qui s'ensuit dépend de l'état du système au moment de la perturbation.

h) Difficultés de compréhension des écosystèmes

Une première étape vers la compréhension des systèmes à rétroaction consiste à manipuler les concepts abstraits du modèle (concepts mathématiques dans les équations de Lotka-Volterra par exemple) tout en gardant à l'esprit le sens des relations fourni par le contexte. Et, faut-il souligner, même les objets concrets impliqués dans de tels systèmes prennent une nature abstraite: les lynx et les lièvres font partie de la population des lynx et de la population des lièvres, et les relations entre les deux populations sont de nature statistique. De plus, les mesures utilisées comme les taux de naissance et les fluctuations du taux d'inflation (dans un autre contexte) sont très complexes.

Par ailleurs, même si les équations définissent clairement les relations entre les variables, en pratique, pour un système particulier, ce sont les solutions (représentées explicitement dans un graphique cartésien) qui les expriment le plus clairement. Comprendre un système à rétroaction se situe au-delà des équations. À notre avis (c'était notre point de départ), la compréhension d'un système à rétroaction passe par l'utilisation efficace des différentes représentations de l'évolution d'un modèle particulier pour arriver à caractériser l'évolution du système. Une de ces représentations particulières est le multi-courbes. Mais comme nous l'avons explicité auparavant, il est difficile d'interpréter ce type de graphique sans clé; et cette clé est fournie par le diagramme causal. Une première compréhension des systèmes à rétroaction pourrait consister à pouvoir coordonner les informations données par les diagrammes causal et multi-courbes de manière à caractériser l'évolution du système.

Des difficultés subsistent toutefois. Jao Ponte (1985), Kerslake (1977), Janvier (1978) et René de Cotret (1985) ont montré que les élèves ont des problèmes à interpréter la variation d'une variable lorsqu'elle n'est pas linéaire. Ils ont aussi montré que c'est difficile pour les élèves de distinguer le taux de variation de la valeur d'une variable à un moment donné. Par exemple, on dira que la marée monte vite lorsqu'elle est haute. René de Cotret semble toutefois avoir réduit la difficulté reliée à ces graphiques à variation non linéaire par un enseignement basé sur des travaux expérimentaux significatifs. Mais, il reste que les boucles à rétroaction sont plus exigeantes dans le sens qu'elles impliquent deux variables avec leur taux de variation respectif. Comprendre un système à rétroaction demande donc de coordonner l'interaction de deux variables avec leur taux de variation, à l'intérieur d'une certaine classe d'interaction.

De plus, les boucles à rétroaction décrivent un processus fondamentalement dynamique qui nécessite l'intégration d'une nouvelle sorte de relation entre variables. Dans les cours de science, les premiers phénomènes qui sont expliqués aux élèves consistent en des relations où une variable (dépendante) est déterminée par une autre (indépendante). Par exemple, la température détermine la longueur d'une corde. La méthode scientifique analytique consiste à

étudier l'effet d'une variable sur une autre en gardant les autres variables fixes. Or, ce n'est pas possible pour les boucles à rétroaction. Aucune variable ne peut être considérée comme dépendante et non plus comme indépendante (sauf peut-être le temps). Ceci constitue un obstacle majeur.

i) Voie vers la compréhension

Une première façon de concevoir la compréhension des systèmes à rétroaction était de pouvoir coordonner les diagrammes causal et multi-courbes. Toutefois, pour les raisons qui viennent d'être évoquées, nous en sommes venus rapidement à la conviction que cette compréhension pourrait être développée grâce à une simulation qui faciliterait la coordination des représentations à condition qu'un certain contrôle du système puisse être réalisé par l'utilisateur, qu'il y ait donc des aspects interactifs, et que celui-ci puisse modifier les conditions ou les relations de système en tout temps et examiner les conséquences de telles modifications. Comprendre un système à rétroaction, tel que nous l'avons défini au départ, consiste à pouvoir en donner les relations, en donner les caractéristiques d'évolution et aussi à pouvoir décrire les conséquences de perturbations.

Nous avons donc finalement associé à la compréhension d'un système à rétroaction, le diagramme de phase, en coordination avec le diagramme causal et le diagramme multi-courbes. Comme nous l'avons spécifié précédemment, le diagramme de phase apporte des informations supplémentaires révélatrices sur les systèmes à rétroaction et introduit cette dimension de prédiction que nous associons à la compréhension de systèmes à rétroaction.

Notre approche est basée sur l'idée que les représentations d'évolution de modèles, telles le diagramme de phase ou le graphique multi-courbes, peuvent être explorées avant même que des représentations de caractérisation⁵ soient construites et développées. Il existe des approches pédagogiques consistant en l'exploration de graphiques dynamiques d'évolution d'un modèle: par exemple, celle de Preece, avec le graphique multi-courbes, et celle de Spain et Soldan, avec le diagramme de phase. Avec ce type d'exploration, comme nous l'avons vu, beaucoup peut être découvert. Cependant, il reste que l'interprétation de graphiques d'évolution n'est pas une tâche facile. Les difficultés soulignées précédemment demeurent. Décrire correctement l'évolution de systèmes à rétroaction suppose être capable d'arriver à la délicate articulation changements-états (représentée en figure 5) ou, en d'autres mots, être capable de combiner niveaux et taux de variation dans le but d'expliquer subséquemment les nouveaux niveaux et taux. La variable temps est omniprésente; ce que souligne Vitale (1988) si pertinemment. En conséquence, pour que les approches d'exploration avec graphique cartésien et diagramme de phase portent fruits, il nous apparaît nécessaire de prévoir préalablement des manipulations pertinentes des caractéristiques contextuelles impliquées. Dans notre jeu, nous jouons non pas sur les valeurs numériques associées aux populations de proies et de prédateurs mais sur les populations elles-mêmes présentées analogiquement. Il s'agit d'actions concrètes, dans le temps, comme si on avait affaire aux vraies populations. Ces manipulations doivent être maîtrisées en conjonction avec la variable temps, puisque les conséquences des actions dépendent de l'état des populations en cours d'évolution. Notre jeu a donc cette double

⁵ Des représentations de caractérisation donnent les relations qui décrivent le modèle: diagramme causal, diagramme en mots, équations.

possibilité: faire manipuler les caractéristiques contextuelles du système et permettre de composer avec le temps.

2. Instrument méthodologique: didacticiel mettant à profit une représentation dynamique et visuelle de l'évolution d'un écosystème

a) Introduction

Comme nous l'avons souligné, la coordination nécessaire des deux types de représentations, le causal et le multi-courbes, est une tâche difficile. C'est la même chose quant à la coordination du causal et du diagramme de phase. Notre entreprise avait pour but d'aider les élèves dans cette tâche. Mais, il nous est apparu que celle-ci ne pouvait être efficace que sous certaines conditions. D'une part, l'élève devait être amené à exercer un certain contrôle sur ces représentations, à intervenir sur l'évolution du système tel que représenté et à prédire les conséquences de ses interventions. D'autre part, il devait manipuler les éléments du contexte en conjonction avec la variable temps.

Différents didacticiels d'exploration de graphiques d'évolution d'écosystèmes existent (nous en avons donné deux exemples), mais l'approche est insatisfaisante. Généralement, elle consiste à fixer les paramètres d'un modèle et à faire exécuter les courbes correspondantes. En aucune manière, l'utilisateur ne peut intervenir sur l'évolution d'une courbe une fois le processus de traçage déclenché.

Ceci constitue à notre sens une limitation pédagogique majeure pour les raisons précitées, mais aussi parce qu'en réalité, non seulement nous observons des systèmes en évolution mais nous sommes souvent amenés à intervenir avec des conséquences pas toujours prévues. Ceci dit, amener les élèves à observer les conséquences de leurs actions sur le système en évolution constitue l'objectif général du jeu que nous avons conçu.

Cet objectif commande un contexte particulier dans lequel les actions peuvent être significatives. Après plusieurs tentatives, nous avons finalement opté pour deux populations de poissons: une population de poissons rouges, (les prédateurs), qui vit sur une population de poissons bleus (les proies). Les actions possibles sont: pêcher les poissons rouges, ce qui a une valeur commerciale, et ajouter au système des poissons rouges ou des poissons bleus. Le contexte central est celui-ci: un pourvoyeur est en charge d'une exploitation commerciale d'une réserve de poissons rouges sur son territoire; le pourvoyeur procure des services aux pêcheurs leur accordant ou non droit de pêche et ensemençant ses lacs en poissons rouges ou bleus si nécessaire.

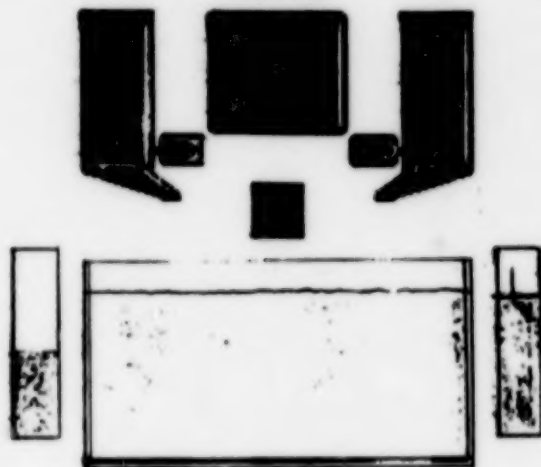
L'interactivité s'est imposée comme source de questionnement. Le contexte se veut «réel», significatif, manipulable. Le choix de la représentation est lui aussi crucial puisqu'il est au centre de notre problématique. Le graphique multi-courbes nous apparaissait trop complexe. Le diagramme de phase quant à lui, n'a pas été découvert tout de suite mais a donné lieu plus tard à une deuxième version du jeu. De toute façon, nous voulions une représentation plus directement accessible, c'est-à-dire plus concrète (moins symbolique) ou plus directement liée

aux objets manipulés et plus simple. Nous avons donc créé une représentation de l'écosystème que nous qualifions d'analogique et de primaire.

b) Présentation du jeu

Le but du jeu est de réaliser le maximum de profit (d'autres buts seront ajoutés dans une version subséquente). Pêcher des poissons rouges rapporte. Ensemencer coûte de l'argent et ensemer des rouges coûte plus cher qu'ensemencer des bleus. Au centre de l'écran se trouve un rectangle de couleur variable selon le nombre de poissons rouges et de poissons bleus dans la réserve (figure 7). La couleur est plus ou moins rouge ou bleue illustrant la variation du rapport des deux populations: par exemple, s'il y a beaucoup de poissons rouges et peu de poissons bleus, la couleur sera plutôt rouge. La couleur est aussi plus ou moins pâle ou foncée pour illustrer la densité de poissons dans la réserve: par exemple, s'il y a peu de poissons au total, la couleur sera presque blanche. En fait, une couleur spécifique, avec un degré de violet et un degré de pâleur, décrit un état particulier du système.

FIGURE 7



LE JEU

De chaque côté du grand rectangle, sont placés deux longs rectangles dans lesquels varient en hauteur une colonne rouge (à gauche) et une colonne bleue (à droite). Ces colonnes représentent l'état de chacune des deux populations séparément en chaque instant (comme sur le multi-courbes).

Les actions du pourvoyeur ou des pêcheurs sont exécutées par l'utilisateur à l'aide de trois icônes.

L'icône de pêche marquée d'un hameçon est placée au-dessus du rectangle violet. En cliquant sur cette icône, des poissons rouges sont retirés de la réserve. Un délai toutefois est accordé, durant la période duquel une décision d'augmenter les captures peut encore être faite; le processus est cumulatif. À chaque «clic», la valeur commerciale des captures est enregistrée dans une case sous le rectangle central. Une fois la pêche terminée, le nombre de «clic» effectués est traduit par un changement soudain de la couleur du rectangle central (le rapport du nombre de poissons des deux populations étant modifié) et par une baisse brusque de la hauteur de la colonne représentant la population de poissons rouges.

Au-dessus du grand rectangle se trouve une horloge fixant le temps d'une partie et de chaque côté deux colonnes dans lesquelles sont stockés en pile des poissons rouges (à gauche) et des poissons bleus (à droite). Ces stocks servent à l'ensemencement des lacs. Cet ensemencement est exécuté en cliquant sur une icône placée à côté de chacune des colonnes. Si on clique une fois, un segment horizontal apparaît en bas de la pile, déterminant un «paquet» de poissons à ensemer. Pour chaque «clic» additionnel, le segment se déplace vers le haut déterminant ainsi un paquet deux fois, trois fois, ... plus gros. Encore ici un délai est accordé afin de cumuler les actions: ensemer un, deux, trois, ... paquets. Une fois que le nombre de paquets à ensemer est fixé, que le délai est écoulé, les paquets se déplacent vers le rectangle central et la couleur en est alors soudainement modifiée. De même, la hauteur des colonnes rouge et bleue, donnant respectivement la population rouge et la population bleue, augmente selon le nombre de paquets rouges et bleus ajouté.

La performance financière du joueur apparaît dans la case de droite sous le rectangle central. En début de jeu, le joueur bénéficie d'une encaisse de 5000\$. Au fur et à mesure des pêches et des ensemencements, l'encaisse change.

Lors des actions le temps est figé. Une fois les actions complétées avec les répercussions immédiates qu'elles impliquent sur la couleur du bassin et sur la hauteur des colonnes rouge et bleue, le système se remet à évoluer en décrivant un cycle de couleur correspondant à la courbe du diagramme de phase sur lequel évolue dorénavant le système (jusqu'à ce qu'une nouvelle perturbation amène le passage à une autre courbe). Les colonnes varient conséquemment.

Dans le jeu est comprimé en quelques minutes une évolution qui prend normalement plusieurs années. Ceci n'est pas sans susciter des problèmes: toute action incontrôlée est rapidement réparable, il n'y a qu'à attendre quelques secondes.

Après réflexion sur le sujet, nous en sommes venus à intégrer au jeu de nouvelles contraintes liées au temps. D'abord les délais accordés lors des pêches et ensemencements donnent du temps de réflexion et permettent de prendre des décisions. Ensuite pêcher prend du temps: lors des pêches, quelques secondes sont prises et l'horloge avance d'autant une fois la pêche terminée.

Une autre règle qui s'est avérée très pertinente est celle des **catastrophes écologiques**. Dans la «vraie vie», il existe une limite à la densité de population que peut supporter un territoire, nous avons donc déterminé des limites au-delà desquelles le système est considéré en catastrophe. En référence au diagramme de phase, la zone de catastrophe se trouve à l'extérieur

d'un quart d'ellipse centrée à l'origine. Les paramètres exacts définissant cette région sont inconnus des élèves et ils ont donc à les découvrir (qualitativement ou analogiquement) par leur propre expérimentation.

Chaque fois qu'un élève se place en catastrophe écologique, une amende est chargée (un pourcentage de l'encaisse alors accumulée): un rectangle apparaît dans le centre de l'écran indiquant «catastrophe écologique» avec le montant de l'amende.

Par ailleurs, on ne peut pas vider la réserve de poissons rouges en une seule suite de décisions. Pour ce faire, nous avons introduit une pêche proportionnelle: lors d'une pêche (un clic), le nombre de poissons capturés est proportionnel au nombre total de poissons disponibles dans la réserve. Nous avons toutefois maintenu la possibilité de perdre une population en introduisant pour chaque population un seuil minimal en deçà duquel la population est considérée exterminée.

À l'exception des valeurs d'argent (le profit réalisé lors des pêches, l'encaisse, les amendes), aucune autre valeur numérique n'est en jeu. La taille des populations n'est jamais donnée numériquement. Le jeu se veut purement analogique et c'est ainsi que les colonnes bleue et rouge, de chaque côté du grand rectangle, ne sont pas graduées. L'idée s'est imposée graduellement pour s'éloigner le plus possible des évolutions décrites numériquement et pour contrer l'attraction toujours puissante des nombres. Par ailleurs, la possibilité de rendre le jeu complètement analogique, en représentant, par exemple, les valeurs d'argent par un segment variable en longueur, a été écartée pour que n'entrent pas en conflit deux représentations trop semblables de deux objets différents et, sur un autre plan, pour le simple plaisir du jeu, car ces valeurs d'argent ce sont les points.

La plupart des paramètres contrôlant le jeu peuvent être ajustés indépendamment. Cependant la marge de manoeuvre n'est pas grande étant donné certaines contraintes: qu'il est souhaitable que la pêche et l'ensemencement prennent à chaque fois entre 3 et 6 «clic», que les colonnes soient aussi pleines que possible, etc.

3. PREMIÈRE EXPÉRIMENTATION

a) Objectifs

L'objectif d'un tel jeu est de donner à l'élève l'occasion d'expérimenter et d'explorer un système à rétroaction, pour ainsi lui permettre de retirer de l'information sur les systèmes à rétroaction, tout au moins sur celui qu'il explore. Nous voulions que le jeu constitue une expérience d'apprentissage, apprentissage de comment jouer ou apprentissage de la rétroaction, la compréhension du système poissons bleus/poissons rouges s'assimilant pour nous à la capacité à jouer. Si quelqu'un arrive à bien jouer, il devrait avoir identifié les caractéristiques du système et être capable de prédire les conséquences de ses actions. Corollairement, les difficultés qu'il rencontre en jouant devraient lui permettre de préciser les composantes de base de la compréhension d'un système à rétroaction. Pour la première expérimentation, les objectifs sont toutefois plus modestes. Il y en a trois.

Nous avons présenté le jeu à des étudiants d'université (Baccalauréat en enseignement des mathématiques). Le jeu apparaissait jouable, en cohérence avec ce que nous voulions proposer, intéressant même. Mais en serait-il de même avec des élèves du secondaire et à partir de quand le jeu était-il jouable? Et surtout, comment ces élèves allaient-ils jouer? Par cette question, nous voulions surtout savoir quelles étaient les **stratégies utilisées par les élèves**, bonnes ou mauvaises, et comment celles-ci se modifiaient au fur et à mesure des jeux.

Notre deuxième objectif visait le **contexte du jeu**: celui des poissons rouges et bleus. Nous voulions savoir dans quelle mesure les élèves s'appuyaient sur ce contexte pour jouer.

Le troisième objectif s'est imposé une fois que l'équipe a pris connaissance du diagramme de phase. Comme nous l'avons précisé précédemment, ce diagramme a la particularité de permettre une prédiction des effets d'une perturbation sur le système. Il traduit donc bien ce que le jeu propose et il est possible de jouer notre jeu en référence constante au diagramme de phase (figure 6b). L'équipe est devenue fort habile à ce jeu, si bien qu'il était dorénavant impossible de jouer autrement. Le troisième objectif voulait donc répondre à la question: est-ce qu'une familiarisation préalable avec le diagramme de phase entraînerait des stratégies différentes de celles découvertes préalablement, ou plus justement des stratégies différentes selon qu'on connaisse ou non le **diagramme de phase**?

b) Sujets

Pour répondre à l'objectif 1, nous avons présenté le jeu en secondaire I. Si le jeu était jouable, pouvait-il l'être sitôt? La question est d'autant plus pertinente qu'on introduit les élèves aux écosystèmes dès le secondaire I. Nous avons rencontré des enfants provenant de deux écoles de la C.E.C.M. Nous n'avons analysé toutefois que les résultats d'une seule en raison de certaines difficultés d'organisation de l'expérimentation dans une première école.

La population étudiée est constituée d'une quarantaine d'enfants de secondaire I, de la polyvalente Pierre-Dupuy. Le tiers environ appartient à une classe dite faible. Le reste provient d'une classe régulière.

Pour répondre à l'objectif 3, nous avons préféré aller en secondaire V, étant donné la complexité d'interprétation d'un graphique tel le diagramme de phase, d'autant plus que les élèves n'ont pas l'habitude de ce type de graphique. Nous avons rencontré deux groupes de seconde du programme français (équivalent secondaire V) du Collège Stanislas. Un groupe a servi de groupe expérimental, c'est celui à qui le diagramme de phase a été proposé, et l'autre groupe a servi de groupe contrôle (groupe à qui le diagramme de phase n'a pas été proposé). Chaque groupe contenait vingt-sept élèves.

Quant à l'objectif 2, les deux populations pouvaient être utiles.

c) Méthodologie

En secondaire I, nous disposons d'une salle de classe où six ordinateurs AMIGA étaient installés en permanence. Les élèves jouaient deux par deux, à l'occasion à trois. Le jeu leur a été présenté dans ce local, devant ordinateur. La présentation a été rapide et n'a consisté qu'à donner les règles du jeu avec les relations de base du système (les poissons rouges mangent les poissons bleus, les poissons bleus ont de la nourriture en abondance). La présentation est faite par le responsable du projet ou par un observateur sur place. Suite à la présentation, les élèves jouent autant de partie que le temps leur permet. Les groupes d'élèves sont sous la surveillance d'étudiants universitaires entraînés à cette fin. Deux caméras vidéo sont constamment en action. Les élèves ont disposé de deux séances de jeu, soit environ deux fois 50 minutes. Notons que le climat général de cette première expérimentation en secondaire I est décontracté avec échange entre équipe et à l'occasion déplacements. Suite à ces séances de jeu et à une première évaluation des résultats, nous avons rencontré, en entrevue individuelle, quelques élèves qui sont apparus intéressants.

En secondaire V, la méthodologie est très différente étant donné l'objectif poursuivi à ce niveau. D'abord, puisque les élèves ne sont pas familiers avec le diagramme de phase, nous avons conçu une séance de présentation de ce diagramme lors de laquelle nous présentions aux élèves une situation familière à nature économique. Cette séance avait pour but de donner du sens aux déplacements de points dans de tels graphiques. Elle est décrite dans la section d de ce chapitre.⁶

Nous avons donc rencontré le groupe expérimental, pour la première fois, pour la présentation de cette séance. Celle-ci s'est déroulée sur une période de 50 minutes, habituellement consacrée à un cours d'économie. Au cours de biologie qui a suivi, le professeur habituel a présenté aux élèves de ce même groupe la situation proies-prédateurs avec les relations impliquées et les changements qui en découlent sur les populations formant le système. Il a présenté le graphique multi-courbes et le responsable du projet a ensuite présenté le diagramme de phase correspondant. Le contexte présenté était celui des mouettes qui mangent des crustacés et petits poissons. Le professeur de biologie du groupe témoin a présenté le système mouettes-poissons comme son collègue. Le diagramme de phase n'a pas été présenté à ce groupe. Aucune séance de familiarisation à celui-ci n'était donc nécessaire.

À la fin de cette rencontre, les élèves ont été introduits au contexte du jeu, poissons rouges - poissons bleus, en précisant qu'il leur serait possible d'intervenir pour modifier l'évolution des populations en pêchant ou ensemençant des poissons. Dans le groupe expérimental, les élèves ont pu se déplacer eux-mêmes à l'intérieur du diagramme de phase en enlevant ou ajoutant des poissons.

Finalement, le jeu a été présenté avec ses règles et durant deux séances de 30 minutes les élèves ont joué par équipe de deux (tout au moins en commençant).

Le tableau 1 donne en résumé la procédure utilisée.

⁶ Les séances de présentation du diagramme de phase et du contexte écologique apparaissent dans leur entier, telles que rédigées et réalisées en appendices 2 et 3 du Rapport de recherche.

TABLEAU 1

Première expérimentation - Secondaire V

	COURS D'ÉCONOMIE	COURS D'ÉCOLOGIE	JEU
GROUPE TÉMOIN	nil	relations proies-prédateurs; multi-courbes et contexte du jeu	présentation et deux périodes de jeu d'environ 30 min., par groupe de deux
GROUPE EXPÉRIMENTAL	présentation du diagramme de phase dans un contexte économique	relation proies-prédateurs; multi-courbes diagramme de phase et contexte de jeu	présentation et deux périodes de jeu d'environ 30 min., par groupe de deux

Comme en secondaire I, les groupes d'élèves sont sur la surveillance d'observateurs entraînés et deux caméras sont en action.

En secondaire I et en secondaire V, des périodes de jeux sont déterminées dans l'horaire scolaire de façon à donner la chance à chacun de jouer deux fois. Toutefois, tout se fait sur base volontaire et il arrive que certains fassent faux bond, mais ils sont peu nombreux.

d) Présentation du diagramme de phase

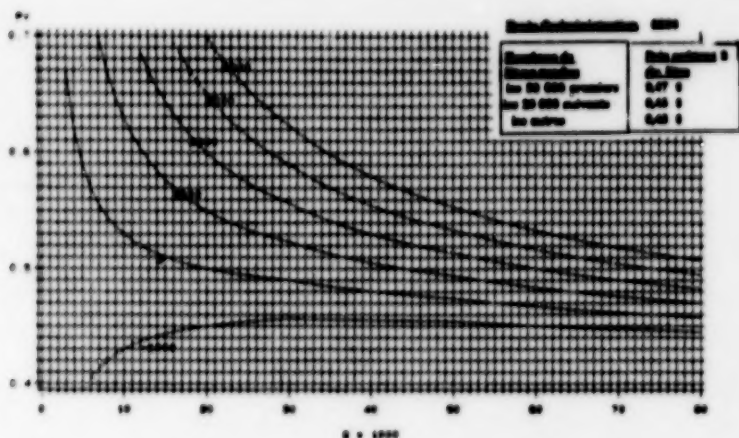
L'introduction du diagramme de phase dans l'expérimentation avait pour but de fournir un outil d'exploration aux élèves. Nous avons choisi une situation différente de celle du jeu ou de l'écologie pour renforcer son rôle d'outil général d'étude.

Le cadre général qui a déterminé les grandes lignes de la séance de présentation du diagramme de phase, menait à donner un sens au déplacement des points dans le plan du diagramme.

La situation retenue pour l'expérimentation implique trois stations services engageant une guerre des prix. Le diagramme de phase représente les variations du prix au litre d'essence et des quantités vendues selon différentes courbes d'évolution du profit. Chaque station est inscrite au départ par un point sur ce diagramme de phase, montrant son prix au litre et la quantité d'essence vendue en une semaine, en ce début de guerre des prix. D'une semaine à l'autre, dans ce processus de guerre des prix, les prix changent et les quantités d'essence vendue également, selon chacune des stations. Celles-ci se déplacent donc sur le diagramme de

phase, d'une courbe de profit à l'autre, à cause des changements survenus dans la compétition qui s'est installée. La performance de chaque station est décrite par une ligne brisée, qui joint chacun des points ainsi enregistrés. Les prix et quantités d'essence changent en raison de facteurs appartenant au contexte.

FIGURE 8



La séance de présentation du diagramme de phase a été testée auprès des étudiants universitaires qui sont devenus par la suite les observateurs.

e) Modalité de participation des sujets et contexte de jeu: premières constatations

Après observation et retour sur les bandes vidéo, nous distinguons deux phases dans les relations entre coéquipiers ou entre équipes.⁷ Au départ et dans la plupart des équipes, semble s'installer le scénario suivant: un des sujets manipule la souris tandis que l'autre observe, rend compte verbalement du comportement du système, critique le jeu de son coéquipier, ou établit la marche à suivre. Souvent le joueur-observateur repère les états du système et indique à son camarade, à sa demande, quand intervenir: «tu me le diras quand il arrête de baisser lui».

Une fois dépassée la première phase d'appréhension des éléments du jeu, les sujets se désintéressent du jeu de leur coéquipier et dans la plupart des cas choisissent d'aller voir ce que les autres équipes font. En outre, quand s'installe une stratégie personnelle de jeu, les sujets démontrent une préférence pour le jeu solitaire. Madeleine situe cette étape autour du 3e jeu en secondaire V et du 10e jeu en secondaire I.

⁷ Ces résultats sont tirés d'un rapport de Madeleine Vachon, produit dans le cadre d'un stage de Doctorat en éducation.

Par ailleurs, en secondaire I, le contexte jeu semble favoriser les relations sociales. Les sujets s'informent spontanément du rendement des autres équipes. Il faut dire que dans un but d'émulation, nous avons ajouté au jeu une dimension de compétition interéquipe (que certains ne manqueront pas de nous reprocher) en donnant aux élèves un record à battre.

f) Résultats de la première expérimentation et conclusions

Les résultats obtenus ne sont pas concluants par rapport à nos objectifs, mais ils n'en sont pas moins intéressants. Notre premier objectif était de vérifier si le jeu était jouable: il l'est et dès secondaire I et il est intéressant. **Cependant, il est jouable dans une certaine limite que nous révèle l'étude des stratégies de jeu.** Nous donnerons ici un portrait global de l'évolution des stratégies tel qu'il nous est apparu. Les résultats ressortent de l'observation des élèves en train de jouer et des protocoles d'élèves dressés d'après les bandes vidéo.

Puisque le jeu consiste à faire de l'argent en vendant ou en pêchant des poissons rouges, il fallait s'attendre, en début de jeu, à ce que les élèves focalisent leur attention sur la population de poissons rouges. C'est ce que la plupart des élèves adopte comme première stratégie de jeu⁸: pêcher, ajouter des rouges, pêcher, ajouter des rouges et ainsi de suite. Mais cette stratégie de départ ne peut tenir longtemps:

- 1) parce que les rouges coûtent chers et que l'achat de rouges pour ensemencement conduit rapidement à une «encaisse» trop basse pour maintenir la stratégie,
- 2) parce qu'une pêche excessive (elle est en fait inconsidérée) mène à la catastrophe (par accroissement excessif des bleus).

Souvent alors, devant l'impasse, plusieurs équipes vont essayer d'ajouter des poissons bleus. Dans les deux groupes, on prendra souvent toute la première période de jeu à tenter, de façon hasardeuse, à se sortir de la stratégie primitive que nous appelons «**exploitation inconsidérée des rouges**». Au départ, il semble que peu de sens soit donné au mouvement des colonnes ou au changement de couleur du rectangle central. L'attention est attirée par l'«encaisse» qui donne le score et il faudra quelque chose de spécial pour qu'elle s'en écarte (un comportement bizarre ou ultime de ce score). Un tournant majeur dans l'évolution des stratégies s'effectue lorsque par nécessité (on ne sait plus quoi faire) ou décision ferme, à un moment ou l'autre, **on laisse le système évoluer** sans intervention et on observe les patterns dans le mouvement des colonnes ou le changement de couleur du bassin. Sans cette décision (ou pseudo-décision), aucun progrès n'est fait vers une stratégie systématique, c'est-à-dire vers un jeu qui reflète un choix d'actions et de moments d'intervention bien précis qu'on répète pour en tester l'efficacité en termes de résultat.

Le premier indice de systématisation est une **pêche au maximum des rouges** (lorsque la population de poissons rouges est à son maximum), accompagnée d'un **abandon de l'ajout de poissons rouges** (on constate que ce n'est pas nécessaire). En phase transitoire vers un jeu optimal, nous observons le plus souvent une tendance à des **jeux prudents**, près de la stabilité, conséquences de catastrophes répétées: on tente de garder le système loin des zones de catastrophes, on évite donc les grandes amplitudes dans le mouvement des colonnes.

⁸ Nous parlons de la stratégie de jeu comme d'un pattern de jeu mais d'un pattern qui s'est avéré être délibéré d'après les commentaires recueillis en cours de jeu.

Dans ce que nous appelons les stratégies systématiques, nous avons observé des stratégies d'exploitation du système par **pêche seulement**: on pêche lorsque la population des rouges est à son maximum, ensuite on attend que la colonne des rouges remonte toute seule ou que le bassin redevienne plutôt rouge (équivalent diagramme: figure 9a). En fait, les élèves ont constaté qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter des rouges, *«ils remontent tout seul»*. Cette stratégie améliore les scores mais elle n'est pas optimale. Certains en resteront là. D'autres changeront de stratégie. Plusieurs auront constaté il y a longtemps qu'**ajouter des bleus peut aider** la population de poissons rouges à croître.⁹ Ce constat, fait tôt ou tard par la plupart des équipes, marque un autre point tournant dans l'évolution des stratégies. Il s'accompagne d'une excitation qui manifeste bien de la non-usualité de la chose. Cette stratégie qui par prudence peut se jouer près du point de stabilité comme nous l'avons d'abord précisé évoluera vers la zone de catastrophe; on arrive ainsi à un jeu efficace, près de l'optimal: la population de poissons bleus est amenée à un maximum, près voire aussi près que possible de la catastrophe, pour aider la population de rouge à croître le plus (équivalent diagramme: figure 9b).

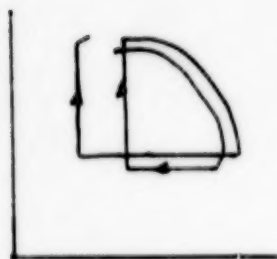
FIGURE 9a



PÊCHE SEULEMENT

⁹ En fait, l'ajout de bleus n'aide pas toujours les rouges (ça il ne le constate pas) mais sitôt la systématisation entreprise avec pêche au maximum des rouges, on ne peut que constater que l'ajout de bleus provoque un accroissement des rouges.

FIGURE 9b



PÊCHE AVEC AJOUT DE B

Nous constatons qu'on joue à la limite de la catastrophe, lorsque manifestement on tente de découvrir le plus grand nombre de poissons bleus qu'on peut donner aux rouges pour aller aussi haut que possible dans la colonne sans provoquer de catastrophe.

On arrive donc majoritairement à la stratégie: ajouter des bleus pour faire monter les rouges, attendre (que les rouges montent), pêcher les rouges (lorsqu'ils sont à leur maximum) et immédiatement rajouter des bleus, attendre,... Cette stratégie restreint les élèves à une région du diagramme de phase (figure 9b). On n'est pas en mesure de constater les effets différents selon les états et les élèves n'exploitent pas plus que les relations de base du système proies-prédateurs: plus il y a de bleus, plus il y a de rouges; moins (plus) il y a de rouges plus (moins) il y a de bleus.

En fait, les relations se formulent comme les effets (immédiats) sur une population des actions qui sont effectuées sur l'autre population: donnons à manger aux rouges pour qu'il augmentent, si on pêche beaucoup les bleus croissent beaucoup, ajoutons des rouges pour contrer la catastrophe (pour manger les bleus). La rétroaction, c'est-à-dire l'action d'une population sur elle-même, est absente. Seule une stratégie par pêche excessive - diminuer les rouges pour les faire augmenter - exploite la rétroaction. Mais cette stratégie n'est pas favorisée par le jeu en raison des risques de catastrophe.

Ce premier résultat nous a conduit à remettre en question notre affirmation comme quoi la performance au jeu était directement liée à la compréhension du système à rétroaction: être bon au jeu ne menait en fait pas plus loin qu'aux relations de base sans rétroaction. Il fallait pousser les élèves en dehors de cette région de jeu où ils se confinaient et améliorer le jeu et ses règles.

La réponse à la troisième question fut tout aussi brutale. En secondaire V, nous n'avons observé aucune différence entre les groupes témoin et expérimental. L'introduction systématique au diagramme à laquelle nous avons soumis le groupe expérimental n'a pas porté fruits. Aucun transfert au contexte du jeu ne semble s'être produit et aucune différence n'a été notée dans les

stratégies du groupe expérimental comparativement au groupe témoin. La sollicitation n'était pas assez forte: il fallait inciter à l'utilisation du diagramme de phase en cours de jeu.

Reste la deuxième question relative au contexte. Sur ce point, nous référons le lecteur au Rapport de recherche: Systèmes à rétroaction, représentations, jeu interactif et expérimentation, septembre 1991.

4. Deuxième expérimentation

a) Entrevues en secondaire I

Dans le but d'améliorer le jeu pour permettre une plus grande exploration de l'ensemble du cycle du système à rétroaction, nous avons rencontré en entrevue cinq élèves de secondaire I. Ces élèves ont été choisis parce qu'ils présentaient un comportement intéressant lors des séances de jeu: tendance à verbaliser, stratégie de zone gagnante bien assurée, références contextuelles fréquentes... Nous rencontrions ces élèves individuellement, sur la période de dîner de l'école. Nous leur demandions de jouer et d'expliquer leur stratégie (comment ils faisaient, pourquoi ils faisaient ça, pourquoi ça et pas autre chose,...). Nous leur avons aussi proposé deux objectifs à atteindre différents, par rapport au jeu qu'ils avaient l'habitude de jouer. L'un des jeux consistait, dans un premier temps, à prédire jusqu'où monterait ou descendrait une colonne et, dans un deuxième temps, à tenter de faire monter ou descendre une colonne sous certaines contraintes d'action fixées par l'interviewer. L'autre jeu consistait à mettre le système en état de stabilité encore sous certaines contraintes fixées par l'interviewer. Ces entrevues n'avaient pas de statut formel et se sont passées en toute liberté.

De ces entrevues, deux «résultats» ressortent que nous formulons comme nouvelles hypothèses d'expérimentation:

- 1) plus on est performant au jeu, plus il est difficile de s'écarter de la zone optimale du jeu,
- 2) le jeu (dans sa première version) développe chez les élèves une base qui leur permet de découvrir plusieurs caractéristiques importantes des systèmes à rétroaction, et sur laquelle pourra s'appuyer éventuellement une étude plus approfondie.

En effet, nous avons constaté chez Marc, joueur très performant et sûr d'être le meilleur, une résistance forte à jouer les autres jeux que nous avons proposés. Marc, un joueur habitué des jeux vidéo, songeait à des améliorations techniques qui pourraient augmenter sa rapidité de jeu et donc son score. Les autres jeux ne donnaient pas de points et n'exploitaient pas ses réflexes développés avec fierté lors des séances de vrais jeux. Par ailleurs, nous avons pu constaté chez Aristide comment pouvait déjà s'articuler en secondaire I les relations entre variables dans une longue chaîne d'inférences. Nous donnons ci-dessous un extrait de l'entrevue réaliser avec Aristide, pour que le lecteur évalue la mesure de nos propos et à titre illustratif des entrevues réalisées.

Extrait de protocole

Il y a deux interviewers identifiés par I1 et I2. Aristide est identifié par A.

- I1: *Es-tu capable de la faire descendre plus bas?* (la colonne des rouges)
 A: *Plus bas? Quand y aura presque plus de bleus, elle va descendre, j'pense.*
 I1: *Elle descend pas plus bas.*

Aristide ajoute deux rouges lorsque les bleus sont au minimum.

- I2: *Pourquoi tu as fait ça?*
 A: *Y aura pu de bleus.*
 I2: *Ah, pour manger les bleus! Et tu penses que s'il y a pu de bleus ça va faire descendre les rouges.*
 A: *Y auront pu à manger.*
 I2: *Essaie de le faire descendre encore plus bas sans pêcher.*

Aristide ajoute deux rouges mais lorsque les bleus sont abondants et que les rouges sont peu nombreux.

- I1: *C'est supposé faire quoi les rouges là?*
 A: *Manger les bleus.*
 I1: *Où il est descendu. Tu l'as eu. Tu as un raisonnement fort. Tu as dit: pour qu'on fasse descendre les rouges plus bas, il faut faire disparaître les bleus.*
 A: *Oui, il faut mettre plus de rouges, là les bleus vont diminuer, les rouges auront presque pu de manger et ils vont descendre plus.*
 I2: *Serais-tu capable de faire la même chose en mettant des bleus?*

Aristide dit ne pas savoir, suggère la pêche, puis ajoute trois paquets de bleus lorsque les rouges sont au minimum.

- I1: *Oui, il est plus bas.*
 I2: *Explique ça.*
 A: *J'ai mis beaucoup de bleus en pensant que les rouges vont monter, là i vont manger les bleus, les bleus i en restera presque pas pi les rouges vont descendre parce qu'il restera presque plus de manger. [On note ici la rétroaction double des rouges sur eux-mêmes et des bleus sur eux-mêmes: 1) on demande de faire diminuer le minimum des rouges et pour ce faire, il augmente le maximum des rouges (par les bleus); 2) son intention paraît être de faire baisser les bleus et il en ajoute.]*
 I1: *Donc t'as tout expliquer ça en bleu et en rouge. Si je te dis la chose suivante qu'est-ce que t'en penses? Les rouges i ont monté, tu les as fait monter et plus qu'i ont monté plus i ont descendu. Est-ce que ça de l'allure?*
 A: *Peut-être.*

- 12: *Ou bien: t'as fait monter les rouges par les bleus. Plus tes rouges ont monté plus tes bleus ont descendu. Plus tes bleus ont descendu plus tes rouges ont descendu.*
- A: *Oui, je pense plus ça.*
- 11: *C'est comme ça que tu penses ça. Tu penses ça mieux que moi. T'as fait descendre tes bleus, i avait pu de bleus, i ont été obligé de descendre. C'est par les bleus que t'expliques les rouges.*
- A: (...)
- 11: (...)
- 11: *I vont tu disparaître les bleus? L'interviewer ajoute des rouges au minimum des bleus.*
- A: *Ça va faire une catastrophe je pense.*
I sont disparus.
- 12: *I sont disparus. Qu'est-ce qui se passe?*
- A: *Ben les rouges descendent.*
- 12: *Pourquoi?*
- A: *I ont pu de manger.*
- 11: *Tu connais ça?*
FIN DE L'ENTREVUE

Dans cet extrait d'entrevue, nous proposons à Aristide ce que nous appellerons dorénavant le jeu du maximum ou du minimum. Ce jeu avec celui de la stabilité sont apparus appropriés pour encourager une réflexion sur les mouvements des colonnes et pour permettre une plus grande exploration du système. Dans ce qui suit, nous décrivons la version informatisée du jeu de la stabilité proposé aux élèves en entrevue, avec les raffinements que nous a permis l'informatique. Notre intention était également de produire une version informatisée du jeu du maximum ou du minimum. Toutefois, question de temps, nous avons dû nous limiter à un seul jeu et nous avons choisi celui de la stabilité (pour des raisons de pertinence écologique).

b) Le jeu de la stabilité

Le jeu de la stabilité se trouve un appendice du jeu ordinaire (le jeu de première expérimentation). Il se joue exclusivement sur colonnes (le rectangle violet est caché). Le but du jeu est de placer et de maintenir une population, ici celle des rouges,¹⁰ près de la stabilité. En pratique, il s'agit de maintenir la population des rouges à l'intérieur d'une région délimitée par deux traits horizontaux sur la colonne représentant cette population. Ces traits déterminent un intervalle autour de l'état de stabilité. Le cycle d'évolution sur lequel se trouve le système est déterminé au hasard.

Les points sont fonction du temps pris pour amener le système dans cette position. Une fois que le joueur juge qu'il a réussi, il déclenche un processus de vérification en cliquant sur une icône prévue à cet effet. L'ordinateur vérifie alors si durant un cycle complet la population reste à l'intérieur des limites fixées. Plus l'état de stabilité est atteint rapidement, plus le score du joueur est élevé. Tout au long du jeu, avant la période de vérification, un score apparaît dans la fenêtre qui cache le rectangle violet, décroissant au fur et à mesure que le temps s'écoule. Le jeu de la stabilité a été utilisé soit en bonus au jeu ordinaire, dans quel cas le bonus était un

¹⁰ Une autre version du jeu prévue concernait la population de poissons bleus.

pourcentage plus ou moins grand du score établi en jeu ordinaire, soit indépendamment du jeu ordinaire, dans quel cas le score représentait un pourcentage de l'encaisse de départ, soit 5000\$.

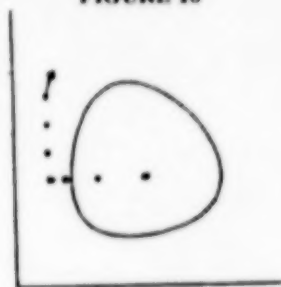
c) La version diagramme de phase de jeu

Une autre amélioration du jeu avait pour objectif de pousser les élèves à se référer au diagramme de phase et ainsi l'entraîner le transfert de stratégies du diagramme au jeu. Nous avons donc conçu une version du jeu où les colonnes absentes sont remplacées par un diagramme de phase. Les paramètres sont les mêmes que pour le jeu ordinaire (avec colonnes) ainsi que les actions permises.

Le diagramme de phase est placé à gauche de l'écran, superposé à l'image du jeu ordinaire. Le mouvement des colonnes est arrêté alors que le rectangle central continue de changer de couleur. Apparaît sur le diagramme, les axes en rouge et bleu et un point qui bouge décrivant une courbe fermée représentant l'évolution du système. Cette première courbe reste en permanence à l'écran, en référence, le temps d'un jeu. Lorsque par une action on change l'évolution du système et qu'on se retrouve sur une autre courbe fermée de la même famille, n'apparaît alors que le point qui bouge avec derrière lui une trace plus ou moins longue de son passage. Toute la trace, c'est-à-dire une courbe complète, aurait embrouillée l'image surtout au fur et à mesure des interventions. La trace laissée ressemble à un serpent qui se déplace suivant un pattern particulier; en fait, il se déplace sur les courbes invisibles du diagramme de phase. Le serpent change de longueur selon qu'il est plus ou moins loin de l'origine. Il change aussi de couleurs en fonction du rapport rouges-bleus, comme le rectangle violet.

Lors d'une opération de pêche, en cliquant comme pour le jeu ordinaire sur l'icône avec hameçon, un pointillé apparaît marquant le passage à une autre courbe (cachée) du diagramme de phase (figure 10). À chaque coup de pêche un point indique l'état de la population de rouges. Étant donné la pêche proportionnelle, plus on pêche plus les points se rapprochent selon le nombre de captures enregistrées. Durant cette opération, le serpent disparaît pour ne réapparaître qu'une fois la pêche terminée. Lorsqu'on ajoute des poissons, un pointillé apparaît également indiquant le nouvel état de la population. On a ici un pointillé à sauts réguliers puisqu'à chaque coup, l'ajout est toujours le même.

FIGURE 10



JEU DIAGRAMME

Cette version du jeu est utilisée conjointement avec la première, celle avec colonnes.

d) Sujets, méthodologie, objectifs et déroulement

Le jeu stabilité et la version diagramme de phase du jeu ont été testés auprès de vingt-quatre élèves de secondaire III de la polyvalente Pierre-Dupuy. Les élèves ont été divisés en deux groupes selon les deux grandes conclusions de la première expérimentation: un groupe «exploration élargie» avec jeu de la stabilité et un groupe «diagramme à forte dose». L'orientation de cette deuxième expérimentation reflète deux convictions: la représentation colonne est assez significative pour permettre une exploration satisfaisante du système à rétroaction et le diagramme de phase est un outil particulièrement approprié duquel on peut tirer une connaissance enrichie de ce même système. Au premier groupe, nous avons proposé le jeu ordinaire, avec colonnes et rectangle violet, de la première expérimentation. Chaque jeu ordinaire était suivi de celui de la stabilité dont les points s'ajoutaient en bonus au jeu ordinaire. Nous appellerons ce groupe «ORD+» pour jeu ordinaire avec bonus. Le deuxième groupe a joué au jeu diagramme en alternance avec le jeu ordinaire, avec colonnes, et a été préalablement préparé à l'utilisation du diagramme de phase comme en secondaire V à l'aide de la situation des trois stations d'essence. À court de temps, le contexte écologique leur a ensuite rapidement été présenté avec diagramme de phase. Nous appellerons ce groupe DIAG. Le contexte écologique a également été présenté au groupe ORD+ mais sans le diagramme de phase.

Le groupe ORD+ a eu droit à deux séances de jeu et le groupe DIAG à trois selon le tableau ci-dessous:

	1re séance	2e séance	3e séance
ORD+	jeu ordinaire	jeu ordinaire + bonus (jeu de la stabilité)	
DIAG	d'abord, jeu ordinaire puis en alternance, jeu ordinaire et jeu diagramme	jeu ordinaire et jeu diagramme en alternance	jeu de la stabilité

Chaque séance de jeux dure environ 50 minutes sauf la troisième du groupe DIAG qui ne dure qu'une trentaine de minutes. Le groupe ORD+ joue le jeu de la stabilité en bonus après chaque jeu ordinaire, tandis que le groupe DIAG joue plusieurs jeux de stabilité les uns après les

autres sans jeux ordinaires. Dans le groupe DIAG le jeu de la stabilité servait de test: si le diagramme permettait une meilleure exploration du système, ceci devait se refléter dans le jeu de la stabilité.

Le groupe DIAG se familiarise avec le jeu ordinaire en jouant quatre ou cinq jeux avant d'aborder le jeu diagramme. Une équipe cependant fera jusqu'à huit essais sur jeu ordinaire, parce que des actions cumulées amènent systématiquement le système en catastrophe et que l'équipe n'a pas l'occasion alors d'observer le mouvement des colonnes.

Encore une fois, les élèves jouent en équipe de deux. Toutes les équipes sont observées comme précédemment et six équipes sont filmées: trois équipes ORD+ et trois équipes DIAG. Les observateurs n'interviennent en principe que pour répondre à des questions d'éclaircissement. Parfois l'observateur a dû toutefois aller plus loin. De plus, après deux séances de jeu, soit à la fin de l'expérimentation pour ORD+ et avant le jeu de la stabilité pour le groupe DIAG, les observateurs posent une série de questions à chaque équipe pour s'assurer des stratégies. Ils demandent entre autres, d'expliquer leur jeu et de donner, s'il y a lieu, leur préférence colonnes ou diagrammes. Des questions sur le jeu de la stabilité sont aussi prévues, en fin d'expérimentation pour les deux groupes.

Pour la deuxième expérimentation, les moyens que nous fournit le jeu amélioré déterminent de nouveaux objectifs. Les questions que nous nous sommes posées sont les suivantes:

- 1) Y a-t-il transfert des stratégies du jeu colonnes au jeu diagramme?
Et, inversement, le jeu diagramme modifie-t-il les stratégies sur le jeu colonnes?
- 2) Est-ce que le diagramme de phase, comme outil d'exploration, aide au jeu de la stabilité?
- 3) Est-ce que le jeu de la stabilité a une influence sur le jeu ordinaire?

Les objectifs de cette expérimentation étaient principalement d'identifier les difficultés des élèves et leurs stratégies plus que les conditions de succès de notre approche. De plus, puisque la taille de notre échantillon ne permet aucune généralisation, nous avons décidé de nous limiter aux six équipes filmées et de les étudier en détail, d'après les bandes vidéo et commentaires des observateurs.

e) Résultats de la deuxième expérimentation et conclusions

La deuxième expérimentation a été l'occasion donc d'analyser en détail les stratégies de jeu de six équipes. Cette analyse révèle une évolution conforme à celle rapportée lors de la première expérimentation, avec une majorité d'équipes qui arrivent à une stratégie dans la région du diagramme de phase identifiée auparavant (figure 10b). L'analyse permet d'identifier également d'autres stratégies. Nous insisterons sur deux. Dans la première, on fait monter la colonne bleue à la limite de la catastrophe en pêchant les rouges presque jusqu'à épuisement du stock. C'est une stratégie efficace peu utilisée parce qu'à l'encontre du réflexe que développe les catastrophes souvent rencontrées dans les premiers jeux à cause de pêche excessive. Dans la deuxième, on ajoute des bleus à la limite de la catastrophe et pêche au maximum des rouges -

c'est la stratégie vers lequel on tend la plupart du temps - jusqu'à un seuil en deçà duquel ça ne vaut plus la peine de pêcher étant donné la pêche proportionnelle. C'est ce que nous reconnaissons comme étant la stratégie optimale. Une seule équipe atteint cette stratégie en secondaire III. Le fait que le profit décroît au fur et à mesure des pêches est peu utilisé dans les stratégies de jeu et n'est pris en considération que tardivement dans le discours des élèves.

Nous voulions vérifier l'impact du jeu de la stabilité sur le jeu colonne et aussi celui du diagramme sur les stratégies de jeu. Voici l'essentiel des résultats.

Le jeu de la stabilité

Il faut d'abord faire quelques remarques préliminaires quant au jeu de la stabilité. L'introduction du jeu avec ses consignes s'est avérée difficile.

Les élèves ne comprennent pas la consigne: ramener la population de poissons rouges entre les deux traits de manière à stabiliser le système. En fait, on ne comprend pas ce que signifie cette stabilité. C'est ce que révèle les observations lors des jeux. Plusieurs explications peuvent être données. On a rarement rencontré cette stabilité durant le jeu ordinaire car le but du jeu éloigne de cet état de stabilité. Dans le jeu ordinaire, on a développé une stratégie basée sur le mouvement contraire des colonnes dans de grandes oscillations. À travers le jeu ordinaire s'est développée une idée d'équilibration, de balancement ou de compensation du mouvement des colonnes pour maintenir le système hors catastrophe. Sauf peut-être quand cette idée s'est traduite par un jeu près de la stabilité, les stratégies se sont construites sur la base d'un dynamisme du système. Et l'idée de stabilité où plus rien ne bouge entre en conflit avec celle d'équilibre dynamique. Par ailleurs, même si on accepte cette idée de stabilité, on peut éprouver des difficultés à en réaliser l'état, les réflexes développés lors du jeu ordinaire (où le but est de faire de l'argent donc de faire monter haut) ne servent plus. C'est ce que nous révèlent les entrevues en secondaire I.

Notons de plus que dans le jeu de la stabilité, nous ne retrouvons pratiquement pas de référence au contexte. Une seule équipe que nous qualifions de «la plus contextuelle de secondaire III» explique: «*Quand i en a pas gros (des bleus) i mange pas gros (...) Quand i en a beaucoup, si c'est dans le bas i va en manger plus.*»

Le concept de la stabilité est difficile et trouve peu de support dans le contexte: comment stopper le mouvement; après tout, les rouges continuent à manger et les bleus à se faire manger! L'interprétation contextuelle en ces termes n'est plus possible. Il faut non plus penser individus, il faut penser population.

Quant aux stratégies, précisons que souvent on ne tient pas compte, dans un premier temps, de l'ensemble du cycle. On laisse descendre les rouges et on vérifie lorsque la colonne rouge arrive entre les deux barres, sans chercher à prévoir le mouvement des colonnes. Si finalement, on l'intègre à la stratégie, on cherche à égaliser les deux colonnes. En fait, dans le modèle utilisé, si le système est en état de stabilité alors la population de rouges égale la population de bleus (ou presque). Il aurait été plus intéressant que ce ne soit pas le cas.

La stratégie de réussite dominante, utilisée pour réaliser la stabilité, est une stratégie de pêche. On laisse les rouges atteindre un maximum et on pêche quand les bleus sont entre les deux traits. Les essais par ajouts de poissons bleus ou de poissons rouges sont sauf exception réalisés à la demande des observateurs.

Ceci dit, les résultats obtenus au jeu de la stabilité, dans le groupe ORD+ comme dans le groupe DIAG étaient prévisibles en cohérence avec notre cadre théorique. Nous ne pouvons mesurer l'impact du jeu de la stabilité sur le jeu des colonnes mais la stratégie sur jeu colonnes permet assez bien de prédire le comportement au jeu de la stabilité. Deux équipes du groupe ORD+ qui ont une approche que nous pourrions qualifier de plus exploratoire, ont un certain succès, voire un grand succès, au jeu de la stabilité. Elles utilisent une stratégie de pêche qu'une des équipes expliquent dans ces termes: *«Plus les rouges montaient plus les bleus descendaient, quant ils (les bleus) étaient à peu près au milieu, on descendait les rouges et on vérifiait»*. Dans le jeu ordinaire, ces équipes ont constaté l'existence de différents cycles dans l'ampleur variable des oscillations en particulier grâce à une ou plusieurs surpêches. Ceci nous fait dire que le jeu du maximum ou du minimum aurait été profitable et peut-être mieux approprié pour susciter une exploration plus complète du système étant donné les commentaires plus haut sur la difficulté intrinsèque à la stabilité. Mais les deux équipes ont eu également l'occasion d'observer la stabilité lors du jeu ordinaire et le jeu de la stabilité, joué après chaque jeu ordinaire, a pu avoir un effet sur ce même jeu.

Ces équipes contrôlent bien les colonnes et considèrent dans leur raisonnement les états simultanés des deux variables du système. Il s'avère que leurs résultats au jeu de la stabilité n'est peut-être pas le fruit du hasard même si une équipe s'avoue mal à l'aise avec ce jeu. Par opposition et pour confirmer, une équipe du groupe DIAG confinée à la région du jeu optimal et dont la stratégie est établie dès les premiers jeux sur colonnes, n'arrive pas à réaliser la stabilité. Nous émettons l'hypothèse que plus vite on arrive à une stratégie optimale, plus fortes sont les habitudes acquises et plus il est difficile de s'en débarrasser pour jouer à établir la stabilité.

Et alors nous pensons que pour que le jeu de la stabilité ait un impact sur le jeu ordinaire il faut qu'il soit introduit le premier, avant le jeu sur colonnes.

Le jeu diagramme

Dans le groupe DIAG, nous avons trois équipes - trois comportements.

Une première équipe transfère sur le jeu diagramme le pattern de jeu utilisé sur le jeu colonnes. Cette équipe adopte une stratégie gagnante dès les premiers jeux sur colonnes et la maintient à travers toute l'expérimentation. Le passage au jeu diagramme s'est fait aisément sans problème. Son meilleur score est au jeu colonnes mais elle dit préférer le jeu diagramme qui lui fournit des repères pour éviter la catastrophe.

Cette équipe peut avoir intégré le diagramme à son raisonnement grâce à la séance de préparation au jeu ou, tout au moins, avoir compris dès cette séance son utilisation. Toutefois, comme nous l'avons déjà dit, cette équipe n'arrive pas à jouer le jeu de la stabilité.

Les deux autres équipes jouent sur colonnes et sur diagrammes deux jeux différents. Pour une équipe, les deux jeux sont (apparemment) sans rapport. Cette équipe arrive sur colonnes à un jeu près de la stabilité. Sur diagramme, elle ne fait qu'explorer: on travaille tout azimut avec, vers la fin, une tentative de systématisation avec passage sur des courbes de plus en plus extérieures puis retour après vers l'intérieur par pêche et ajout de poissons bleus. Elle dit toutefois n'y rien comprendre. Cette équipe réussit assez bien le jeu de la stabilité.

Pour l'autre équipe, le jeu sur diagramme a permis de jouer efficacement sur colonnes mais par l'intermédiaire d'une interprétation farfelue du diagramme. En effet, avant diagramme, le jeu sur colonnes en est un d'exploitation inconsidérée des rouges (-R, +R, -R, ...). Une fois observée un premier jeu sur diagramme la stratégie change et se développe parallèlement deux patterns de jeu selon qu'on joue sur colonnes ou sur diagramme.

Sur colonnes le pattern observé est le suivant: après pêche, on ensemece des bleus, puis des rouges, on «laisse monter» puis on repêche lorsqu'on a beaucoup de rouges.

Sur le diagramme, la stratégie consiste à pêcher lorsque le serpent est rouge puis à laisser avancer jusqu'à ce que le serpent soit redevenu rouge. Sur diagramme, il n'y a pas d'ensemencement. Nous trouvons dans ce qui suit une justification: «Là (elle montre le diagramme) ils avancent pour nous les poissons tandis que dans l'autre c'est toujours nous qui fournis, c'est rare qu'ils montent les poissons».

En fait, les stratégies différentes relèvent des particularités visuelles des deux jeux et sont le fruit en particulier des caractéristiques visuelles du jeu diagramme: serpent qui se promène (sur des courbes non visibles), changement de couleur du serpent fonction du rapport R/B, disparition du serpent lors des pêches, pointillé (marquant les passages d'une courbe cachée à une autre cachée) illustrant les pêches, retour du serpent sitôt la pêche terminée.

Il semble que cette équipe ait interprété le diagramme de façon très particulière (pseudo-concrète), faute de comprendre ce qui se passe, et ait tenté de faire le rapport entre les deux jeux par l'intermédiaire du seul élément visuel commun, la couleur variable du bassin dans le jeu colonne et du point qui bouge [représentant le couple (R,B)], dans le jeu diagramme. Elles disent préférer le diagramme:

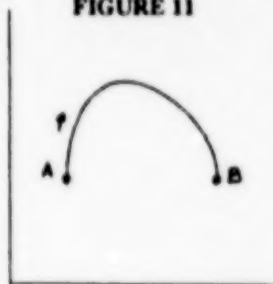
- T: «parce qu'on peut voir tout. L'autre on voit pas comment il dirige sauf en regardant juste les couleurs (elle montre le bassin) puis les côtés (elle montre les colonnes). Et ici, on voit comment on avance (elle suit du doigt la courbe de référence).»
- D: «oui, on a découvert plus vite qu'avec les colonnes. Ceux avec les colonnes, on eu de la misère à trouver lesquels aident le plus les rouges. Ça change pas des couleurs. Parce que dans le diagramme, quand il change (elle suit du doigt la courbe) il change de couleur ce côté-là (elle montre le diagramme) et dans l'autre, il change aussi (elle montre le bassin).»¹¹

¹¹ Les deux codépières ont beaucoup de difficulté à s'exprimer.

Il s'est créé alors des glissements contextuels majeurs, dans les données mêmes du jeu: on a réinterprété le jeu. On explique le jeu par le diagramme parce que, dit-on, on ne peut le faire par les colonnes.

- D: *«Je laisse le serpent qui avance parce que quand le serpent est sorti, il a commencé à la couleur bleue. (Elle indique ce qui correspond au point A sur la figure 11.) Pis si je mange des rouges, il s'en va, il se déplace, il s'en vient par ici, là c'est des rouges. (Elle simule avec son doigt le mouvement et indique le point B sur la figure 11). Là tu manges pis ça augmente l'argent de plus que les bleus. Parce que quand je mange ce bleu là (elle indique le point A) ça mange 70. Pis quand j'attends pis qu'arrive le tour des rouges pis que je mange alors ça augmente.»*

FIGURE 11



Le nouveau jeu, joué sur diagramme, n'a pas créé de conflit chez les protagonistes puisqu'elles n'avaient plus à ensemercer (on leur fournissait les poissons) et que la pêche des bleus n'était pas possible.

Au jeu de la stabilité, cette équipe focalise son attention sur les rouges et revient à la stratégie de départ. Elle ne réussit aucun des essais effectués.

Il s'avère que le diagramme de phase n'est pas une garantie d'une plus grande exploration du système, il n'aide pas en effet à jouer au jeu de la stabilité et ne modifie pas les stratégies sur jeu ordinaire. Au contraire, la première stratégie utilisée par les élèves a créé des habitudes qui sont difficiles à déloger. Le jeu diagramme se révèle difficile et de nos constatations nous déduisons que le transfert du jeu colonne au jeu diagramme doit être soigneusement planifié.

5. Conclusions et recommandations

a) Utilisation du jeu en classe

Nos résultats d'expérimentation nous mènent à la conclusion que le jeu ne peut être introduit sans le support d'un professeur. Nous croyons en effet que pour que le jeu ait une utilité pédagogique, il doit être intégré à une séquence d'enseignement organisé par un professeur. Il peut être utilisé comme amorce pour explorer des idées qui sont difficiles, et point de départ à des discussions, avant toute présentation par le professeur des notions rattachées aux

systèmes à rétroaction. Ou bien, il peut être utilisé pour vérifier ou tester des hypothèses auxquelles on est arrivé en classe. Le jeu doit être considéré comme un environnement d'exploration qui met en contact avec les relations de base proies-prédateurs d'un écosystème. Ainsi il peut paver la voie à des habiletés de modélisation plus quantitatives à être présentées, elles, à la fin de l'école secondaire ou du collège. Notre jeu est essentiellement une première occasion d'exploration des représentations de l'évolution de système.

Avec la description dynamique de l'évolution à l'aide des colonnes, il conduit entre autres à l'introduction de la représentation plus abstraite qu'est le diagramme de phase.

b) Compréhension des systèmes à rétroaction et potentialités de notre approche

Malgré des résultats expérimentaux décevants, notre approche a de grandes possibilités qu'à l'occasion nos observations laissent entrevoir. Notre approche a deux caractéristiques fondamentales: elle est **interactive** et elle place au premier plan **l'évolution** du système à rétroaction. Ainsi, elle permet une exploration de cette évolution: c'est sa puissance. Le mouvement des colonnes procure une bonne base rendant possible une analyse correcte des taux de variation: ça va vite, ça va lentement, ça ralentit, ça accélère... Il montre également l'amplitude dans la grandeur des deux populations. Il montre que les changements dans les deux populations sont liés. Tout ceci est renforcé par la version diagramme de phase du mouvement des colonnes. Nous croyons que la double référence possible, colonne et diagramme de phase, ajoute à la compétence des élèves pour décrire l'évolution des systèmes et les conséquences de perturbations.

Le diagramme de phase montre qu'à un ensemble initial de populations est attaché un parcours et que changer une des populations mettra le système sur un autre parcours. Il montre que le système se trouve sur une trajectoire fermée - parmi d'autres trajectoires «concentriques» qui déterminent son évolution. La périodicité du phénomène s'associe alors à des courbes fermées. À chacune de ces courbes correspond une manière d'être en équilibre dynamique.

Le diagramme permet de découvrir un point central où le système ne bouge plus. Les colonnes sont alors immobilisées. Dans l'équilibre dynamique, qu'illustre le mouvement des colonnes, existe donc un point de stabilité.

Le jeu avec diagramme permet donc de conceptualiser l'équilibre dynamique de deux façons: un pattern régulier et une courbe fermée. Les séries d'états d'équilibre sont illustrées par les courbes concentriques sur lesquelles le système évolue.

Ceci conduit les élèves à prendre conscience que les actions sur une population peuvent avoir deux effets différents sur l'autre. Une même action peut amener le système vers plus de stabilité ou plus d'instabilité selon l'état dans lequel se trouve le système au moment où l'action est posée. En changeant une population, on peut ou bien bouger vers l'intérieur de la courbe fermée, dans quel cas le système est amené vers plus de stabilité, ou bien vers l'extérieur de la courbe et alors le système est amené vers moins de stabilité. Dans ce dernier cas, une courbe fermée plus grande correspond à de plus grandes amplitudes dans le mouvement des colonnes.

Comme conséquence écologique fondamentale, changer un système en supprimant presque totalement une population peut résulter en un accroissement dangereux de la population qu'on voulait exterminer.

Un examen plus minutieux du diagramme de phase peut même suggérer que les maxima et minima sont tous colinéaires (vertical ou horizontal) avec le centre d'immobilité du système. En termes de mouvement des colonnes, ceci signifie que chaque fois qu'une colonne atteint un extremum l'autre est au centre de stabilité (ce dont certains élèves ont vraisemblablement eu l'intuition durant notre expérimentation).

Une approche basée sur l'exploration de l'évolution d'un système, avec toute l'information qu'on peut en tirer, peut même s'inscrire dans une démarche de modélisation, comme nous l'avons déjà dit.

c) La modélisation

Une discussion sur la validité du modèle de Lotka-Volterra, en termes de patterns obtenus dans le diagramme de phase, peut en classe se greffer à l'exploration du système. Y a-t-il un sens écologique à penser que toute paire de populations restera à évoluer autour d'un point de stabilité? Les populations n'auront-elles pas tendance à tendre vers cet état de stabilité? Des vérifications expérimentales s'imposent. Mais on peut se poser la question, quel type de diagramme de phase pourrait mieux rendre compte de ce retour à l'équilibre? En fait, converger vers plus de stabilité correspond à des évolutions qui spiralent vers le point de stabilité (figure 6c). Cette convergence dépendra des populations mixées et du milieu spécifique dans lequel elles se trouvent. Cette évolution en spirales, c'est exactement le comportement du système qu'on obtient lorsqu'on introduit dans le modèle de Lotka-Volterra un niveau de saturation pour la population des proies («checked growth»).¹² Dans un processus de modélisation en classe, on peut ainsi construire des modèles de plus en plus sophistiqués pouvant rendre compte de différents comportements de systèmes en travaillant sur les équations.

Continuons l'analyse de notre modèle. Des discussions que nous avons eu avec le docteur Schaefer et différentes lectures effectuées plus tard [Abraham and Shaw (1984); May (1978)] nous suggèrent que le modèle de la spirale est souvent inapproprié. Par ailleurs, l'utilisation que nous faisons du modèle de Lotka-Volterra apparaît légèrement incorrect et ne peut être vérifiée dans la nature. En fait, il semble que dans la plupart des cas, le système n'évolue pas sur cet ensemble de courbes concentriques de notre diagramme de phase, en se plaçant sur une courbe différente suite à une perturbation et y restant une fois le système laissé à lui-même. Le modèle de Lotka-Volterra représente plutôt le système lorsque celui-ci a atteint son équilibre dynamique. En d'autres mots, pour une paire de population initiales, si on s'éloigne du chemin d'équilibre, le système revient à sa trajectoire initiale spiralant vers l'intérieur ou vers l'extérieur (voir figure 12).¹³

¹² Dans l'équation 1a' de l'appendice, k_1 devient $\frac{M - 1(t)}{M} k_1$ où M représente le maximum de lièvres (saturation).

¹³ Voir modèle de Holling-Tanner présenté dans Spain et Soldan (1983).

FIGURE 12



Nous pourrions poursuivre en élaborant sur tout un domaine d'étude qui est celui de la géométrie des systèmes dynamiques, avec la notion d'attracteurs. Nous reportons le lecteur à Abraham et Shaw (1984): «The key to the geometric theory of dynamical systems is the phase portrait of a dynamical system ... [qui décrit] all possible states of the system: the state space.» Les représentations d'évolution à la base de notre approche sont des exemples simples qui illustrent aisément une analyse géométrique de systèmes à équilibre dynamique. Même avec le pendule, considéré comme système, le diagramme de phase donne trois courbes, en trois dimensions, montrant comment la distance à l'origine, la vitesse et l'accélération varient.

d) Conclusions et suites à donner

Une idée centrale de l'étude des écosystèmes, est la notion d'équilibre dynamique. Elle doit être patiemment construite à l'encontre du concept prédominant de l'équilibre statique ou de la stabilité. Comme nous l'avons montré, notre approche est propice à une exploration fructueuse de cette notion et de deux façons, à l'aide du mouvement des colonnes et à l'aide du diagramme de phase, ce dans un environnement interactif. Mais même si beaucoup peut être fait à l'aide seulement des diagrammes de phase, nous ne prétendons pas que ce soit suffisant. L'analyse des représentations de caractérisation d'un écosystème doivent également être introduites éventuellement. Différentes conférences auxquelles a participé le responsable du projet, ont permis de voir plus précisément le rôle que notre jeu pouvait jouer dans le développement de comportements de modélisation. L'aller retour entre les représentations de définition ou de caractérisation (équations, programme LOGO, STELLA, ...) et les représentations d'évolution, pour tester des hypothèses, apparaît un défi majeur pour une activité de modélisation qui implique des habiletés telles que la coordination d'un grand ensemble de représentations ou le passage de l'une à l'autre. Une attention particulière doit bien sûr être apportée aux comportements requis pour effectuer ces transferts d'une représentation à l'autre. Il nous semble maintenant que l'exploration de l'évolution de systèmes, avec un ensemble de représentations d'évolution équivalentes, dans un contexte significatif, est une approche qui encourage des compétences de transfert précieuses en modélisation.

Nous envisageons donc des développements ultérieurs à notre jeu. Le jeu sur colonnes et avec diagramme de phase peuvent servir d'introduction à l'étude d'autres systèmes plus complexes, en économie, en biologie, en gestion, en physique, etc. Il pourrait être intéressant d'insérer différents contextes et de rendre ainsi le jeu plus propre à être utilisé dans des cours autres que l'écologie ou les mathématiques.

Mais vite interviennent des systèmes à plus de deux variables. Il est possible de créer une version du jeu actuel en y intégrant une troisième variable, ce qui suppose un diagramme en trois dimensions.

Enfin, comme nous l'avons déjà souligné, il est souhaitable de donner accès à l'élève à différentes représentations. Nous pouvons en particulier ajouter au jeu actuel une version avec graphique multi-courbes. On peut aussi permettre à l'élève d'accéder à des représentations de définitions telles que l'équation, par exemple. Le modèle peut être présenté en boîte noire, comme c'est le cas actuellement, mais l'utilisateur pourrait aussi avoir accès non seulement aux paramètres du jeu, pour les modifier, mais également aux équations. Nous pensons alors à la possibilité d'utiliser d'autres modèles que celui déjà proposé, un modèle correspondant à une évolution en spirale par exemple. Des travaux futurs devraient s'appliquer à la tâche d'assurer le lien entre les représentations d'évolution et celles de définition.

BIBLIOGRAPHIE

- Abraham, R.H., Shaw, C.D. (1984). *Dynamics, the Geometry of Behavior: Part One: Periodic Behavior*. Santa Cruz, California, Aerial Press.
- Baker, G.L., Gollub, J.P. (1990). *Chaotic Dynamics: an Introduction*. Cambridge University Press.
- Bellman, R. (1964). Control Theory. *Scientific American*, septembre.
- Bertin, J. (1967). *Sémiologie graphique*. Mouton, Gauthier-Villars, Paris.
- Braunschweig, B. (1985). *La simulation sur micro-ordinateur: les modèles dynamiques des systèmes*. Eyrolles, Paris.
- Denham-Preece, J. (1978). Predator-Prey Relationships, in M.E. Leveridge (Ed.): *Computer in the Biology Curriculum*. Edward Arnold.
- Forrester, J.W. (1973). *Principles of Systems*. Cambridge, Massachusetts: Wright-Allen Press Inc.
- Girardon-Morand, C. (1987). *Une étude des conceptions rattachées à la notion de transformation*. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Montréal comme exigence partielle de la maîtrise en mathématiques, septembre.
- Janvier, C. (accepté pour publication). The Use of Interactive Software for the Exploration of Simple Feedback Systems, in D.L. Ferguson (Ed.): *Advanced Technologies in the Teaching of Mathematics and Science*. Advanced Technologies in the Teaching of Mathematics and Science. NATO Advanced Research Workshop, England: July.
- Janvier, C., Mary, C. (1991). *Rapport de recherche: systèmes à rétroaction, représentation, jeu interactif et expérimentation*. Rapport de recherche, F.C.A.R., PAFACC, CIRADE, UQAM, 111 pages.
- Janvier, C. (1978). *The interpretation of complex cartesian graphs representing situations - studies and teaching experiment*. Ph.D. dissertation, University of Nottingham.
- Janvier, C., Garançon, M. (1989). Graphical Understanding of Simple Feedback Systems, in T. Eisenberg & T. Dreyfus (Eds): *Focus on Learning Problems in Mathematics.11(1-2)*.
- Kerslake, D. (1977). *The concept of graphs in secondary school pupils aged 12-14 years*. M. Phil. thesis, Chelsea College, University of London.
- Koçak, H. (1986). *Differential and Difference Equations through Computer Experiments*, (with Diskettes Containing PHASER), New York, Springer-Verlag.
- May, R.M. (1978). Mathematical Aspects of the Dynamics of Animal Populations, in S.A. Levin (Ed.): *Studies in Mathematical Biology, Part II*. The Mathematical Society of America.
- Pentony, P. (1985). Gregory Bateson and Cybernetics, in W. Maxwell (Ed.): *Thinking, the Expanding Frontier*. The Franklin Institute Press.
- Ponte, J. (1985). Geometrical and Numerical Strategies in Student's functional Reasoning. *Proceedings of the Ninth PME conference*, Noodwijkerhout, Holland.
- René de Cotret, S. (1985). *Étude historique de la notion de fonction: analyse épistémologique et expérimentation didactique*. Mémoire de maîtrise présenté à l'Université du Québec à Montréal, avril.
- Rosney, J. de (1975). *Le microscope. Vers une vision globale*. Paris: Éditions du Seuil.
- Schaefer, G., Eulefeld, G. (1978). *Biological Equilibrium*, Teaching Unit. The Institute for Science Education, University of Kiel.

- Schecker, H. (1992). The didactical Potentiel of Model-Building Systems for Physics Education, in David L. Ferguson (Ed.): *Advanced Technologies in the Teaching of Mathematics and Science*, (7), published by Springer-Verlag, printemps.
- Spain, J.D., Soldan, T. (1983). *Predation*. The University of Iowa, CONDUIT.
- STELLA 2.0 - Software for education. High Performance Systems, 13 Darmouth College Highway. Lyme, NH, USA 1987.
- Tinker, F.R. (à paraître). Measuring and Modelling, in David L. Ferguson (Ed.): *Advanced Technologies in the Teaching of Mathematics and Science*, (12), published by Springer-Verlag, printemps.
- Vitale, B. (1988). *Psycho-Cognitive Aspects of Dynamic Model-Building in Logo: A simple Population Evolution and Predator/Prey Program*, Journal for Educational Computing Research, 4(3).

APPENDICE

LE MODÈLE DE LOTKA VOLTERRA

Utilisons l'exemple type lièvres-lynx. On suppose que les lièvres ont de la nourriture en abondance et sans limite et que les lynx vivent exclusivement des lièvres.

Le modèle de Lotka-Volterra peut se déduire directement du diagramme causal de la figure 3', avec ses quatre relations.

Relation 1 et ses équations

Les lièvres (I) laissés à eux-mêmes voient leur population augmenter à un taux constant de façon telle qu'ils connaissent une croissance exponentielle. Soit $I(t)$ le nombre de lièvres au temps t , alors on a:

$$I'(t) = k_1 \times I(t) \quad \text{où } k_1 \geq 0 \quad [\text{équation 1a}]$$

$$I(t+\Delta t) - I(t) = k_1 \times I(t) \times \Delta t \quad \text{où } k_1 \geq 0 \quad [\text{équation 1b}]$$

Relation 2 et ses équations

Les lynx (L) laissés à eux-mêmes voient leur population décroître à un taux constant (décroissance exponentielle) jusqu'à leur disparition n'ayant plus rien pouvant assurer leur subsistance. Soit $L(t)$ le nombre de lynx au temps t , on a alors:

$$L'(t) = -k_2 \times L(t) \quad \text{où } k_2 \geq 0 \quad [\text{équation 2a}]$$

$$L(t+\Delta t) - L(t) = -k_2 \times L(t) \times \Delta t \quad \text{où } k_2 \geq 0 \quad [\text{équation 2b}]$$

Les relations 1 et 2 sont traduites par deux équations selon qu'on considère un accroissement continu ou discret. La première est une équation différentielle et la seconde son correspondant en différences finies.

Si les populations sont laissées à elles-mêmes, on a, dans les deux cas, une fonction exponentielle. Les équations qui suivent décrivent les conséquences de les jamer. Les relations 3 et 4 expriment la relation proies-prédateurs.

Relation proies-prédateurs et les équations correspondantes

Les deux populations agissent l'une sur l'autre de telle sorte que le taux de croissance normale des lièvres décroît (augmente) avec toute croissance (décroissance) dans la population de lynx (relation 3) et que le taux de croissance normale des lynx augmente (diminue) avec toute croissance (décroissance) dans la population des lièvres (relation 4). Les conséquences de cette relation proies-prédateurs peuvent se traduire numériquement par un facteur de rencontre des individus des deux populations. Lotka-Volterra utilise comme facteur de rencontre le produit des deux populations. Le taux de variation de chacune des populations, $I(t)$ et $L(t)$, doit donc être corrigé par un facteur $I(t) \times L(t)$, positif pour les lynx et négatif pour les lièvres. Les équations 1a, 1b et 2a, 2b deviennent donc respectivement, avec $k_3 \geq 0$ et $k_4 \geq 0$:

$$I'(t) = k_1 \times I(t) - k_3 \times I(t) \times L(t) \quad \text{[équation 1a']}$$

$$I(t+\Delta t) - I(t) = k_1 \times I(t) \times \Delta t - k_3 \times I(t) \times L(t) \times \Delta t \quad \text{[équation 1b']}$$

$$L'(t) = -k_2 \times L(t) + k_4 \times I(t) \times L(t) \quad \text{[équation 2a']}$$

$$L(t+\Delta t) - L(t) = -k_2 \times L(t) \times \Delta t + k_4 \times I(t) \times L(t) \times \Delta t \quad \text{[équation 2b']}$$

Des exemplaires du présent document sont en vente à l'adresse suivante:

Centre Interdisciplinaire de Recherche sur
l'Apprentissage et le Développement en Éducation
Université du Québec à Montréal
C.P. 8888, Succ. A,
Montréal, Québec
H3C 3P8

Publié par le Centre Interdisciplinaire de Recherche
sur l'Apprentissage et le Développement en Éducation
Université du Québec à Montréal
Conception graphique: Pierrette Pélissier
